www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT

JAARGANG 31, 1970, no. 4

Het „emmertjesgeheugen", een schuifregister voor analoge signalen

F. L. J. Sangster

De informatietheorie leert ons dat een signaal met bandbreedte B geheel is bepaald door 2B bemonsteringen per seconde. Door deze waarden vast te leggen in de cellen van een soort schuifregister (b.v. als ladingen in condensatoren), kunnen we ook voor een analoog signaal gebruik maken van de aantrekkelijke mogelijkheden van het schuifregister — met name als vertragingslijn. Het doorschuiven van de analoge informatie is jarenlang een groot probleem geweest; hiervoor heeft de auteur nu een eenvoudige en fraaie oplossing gevonden. Wegens de analogie met de oervorm van brandbestrijding, waarbij emmers water worden doorgegeven, wordt voor dit soort schakelingen de term „bucket-brigade delay lines" gebruikt; in het Philipslaboratorium is als vertaling hiervan de term „emmertjesgeheugen" ontstaan.

Bij het verwerken van analoge signalen, bij voorbeeld audio- of video-signalen, heeft het realiseren van een tijdsvertraging altijd problemen opgeleverd, aangezien hiervoor tot nu toe geen algemeen bruikbare elektronische methode bestond. Voor bewerkingen als versterken, moduleren, detecteren, filteren, enz., bestaan eenvoudige elementen of schakelingen, maar voor het vertragen moet men meestal zijn toevlucht nemen tot niet-elektronische systemen. Wel kan men een signaal vertragen door het een elektrische transmissielijn te laten doorlopen, b.v. een coaxiale kabel, of een *LC*-netwerk waarbij de verdeelde zelfinductie en capaciteit van een kabel is geconcentreerd in een aantal spoelen en condensatoren. Deze vertragingslijnen zijn echter slechts bruikbaar voor vertragingen van hoogstens enkele microseconden bij video-signalen, en enkele milliseconden bij audio-signalen. Zowel aan de vertraging als aan de bandbreedte worden meestal veel hogere eisen gesteld. Voor enkele kleurentelevisiesystemen is b.v. een vertraging van 64 μs nodig bij een bandbreedte van 1 MHz; hiervoor zijn vertragingslijnen vervaardigd die gebruik maken van de voortplanting van ultrasone golven in glas [1]. Bij geluidsinstallaties, waarbij voor het imiteren van nagalm vertragingen van enkele tientallen milliseconden nodig zijn, worden ofwel magneetbandgeheugens gebruikt, die echter vrij omvangrijk zijn, ofwel constructies waarbij mechanische trillingen zich voortplanten in een metalen strip, veer of plaat [2].

Het idee om een schuifregister voor analoge signalen te maken en dit te gebruiken als vertragingslijn, stamt uit het begin van de jaren vijftig [3]. Het principe van een analogon-schuifregister is eenvoudig: bemonsterde waarden van het analoge signaal worden in de vorm van ladingen opgeslagen in een reeks condensatoren. Tussen deze geheugencondensatoren bevinden zich een

F. L. J. Sangster, medewerker van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

[1] Zie b.v. C. F. Brockelsby en J. S. Palfreeman, Ultrasone vertragingslijnen en hun toepassing in de televisie, Philips techn. T. **25**, 326-347, 1963, en F. Th. Backers, Een vertragingslijn voor PAL-kleurentelevisieontvangers, Philips techn. T. **29**, 251-259, 1968.

[2] Zie b.v. R. Vermeulen, Stereonagalm, Philips techn. T. **17**, 223-231, 1955.

[3] J. M. L. Janssen, Discontinuous low-frequency delay line with continuously variable delay, Nature **169**, 148-149, 1952. G. A. Philbrick, Bucket-brigade time delay — a palimpsest on the electronic analog art, Philbrick Researches, Boston (Mass.), 1955.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info

11/14/2023

soort „schakelaars", die op bevel van een klokimpuls de ladingen één condensator opschuiven. Aangezien elke geheugencondensator zijn nieuwe lading pas kan opnemen als eerst de oude is afgevoerd, kan slechts de helft van de condensatoren informatie bevatten en zijn de tussenliggende leeg. *Fig. 1* geeft schematisch een dergelijk „emmertjesgeheugen" weer; in fig. 1*a* bevatten de condensatoren met even nummer informatie

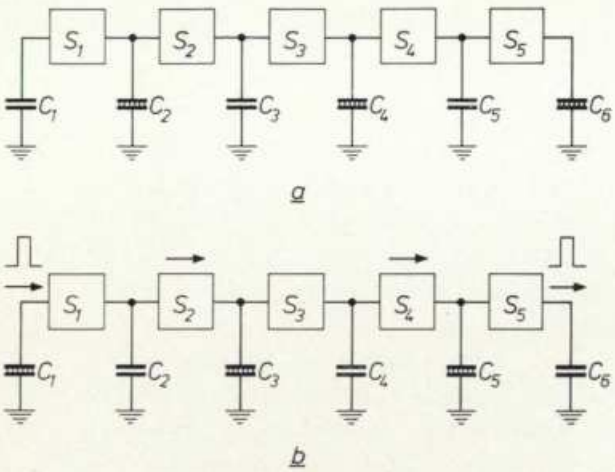

Fig. 1. De werking van een analogon-schuifregister (emmertjesgeheugen). Bemonsteringen van het signaal worden opgeslagen in de vorm van ladingen in condensatoren, en worden door „schakelaars" S van links naar rechts verplaatst. Steeds bevat slechts de helft van de geheugencondensatoren een signaalwaarde, b.v. alleen die met even rangnummer (*a*), terwijl de tussenliggende ontladen zijn. Terwijl de informatie uit de condensatoren met even nummer door de schakelaars S_2 en S_4 wordt doorgegeven naar de condensatoren met oneven nummer, wordt aan de ingang een nieuwe signaalwaarde toegevoerd en aan de uitgang een waarde afgegeven (*b*). Daarna wordt door de schakelaars S_1, S_3 en S_5 de informatie weer doorgegeven naar de condensatoren met even nummer, enz.

en zijn de tussenliggende leeg. in fig. 1*b* is de informatie via de schakelaars S_2 en S_4 doorgegeven naar de condensatoren met oneven nummer, terwijl aan C_1 een nieuwe bemonsterde signaalwaarde is toegevoerd, en aan de uitgang een signaalwaarde is afgeleverd. Als volgende stap wordt de informatie dan weer naar de even condensatoren doorgegeven. De schakelaars worden dus bedreven met de bemonsteringsfrequentie, maar de even en de oneven schakelaars met een onderling fazeverschil van een halve periode. Het schuiven en het bemonsteren wordt in de praktijk door een zelfde klokimpulssignaal verzorgd.

De vertragingstijd τ die met een dergelijk schuifregister kan worden bereikt, hangt af van de bandbreedte B van het signaal. Uit de informatietheorie weten we nl. dat om een analoog signaal volledig te beschrijven, minstens $2B$ bemonsteringen per seconde nodig zijn [4]. Om een vertraging τ_0 te realiseren, moet het register dus $2B\tau_0$ waarden kunnen vastleggen — in het geval van fig. 1 zijn hiervoor $4B\tau_0$ condensatoren vereist — en moet de frequentie van de klokimpulsen die het bemonsteren en het schuiven verzorgen, $2B$ bedragen. Voor een grotere τ is een langer register nodig, maar een kleinere vertraging kan men bij gelijkblijvende lengte van het register ook bereiken door de klokimpulsfrequentie te verhogen. In dit gebied kan men de vertragingstijd dus continu instellen door de klokimpulsfrequentie te variëren, waarbij deze uiteraard niet lager dan $2B$ mag worden.

Toch zijn deze vertragingslijnen tot nog toe niet algemeen in gebruik gekomen. De „schakelaars" S blijken nl. ingewikkeld en omvangrijk te worden door de hoge eisen waaraan ze moeten voldoen. We willen immers de spanning ongewijzigd op de volgende condensator hebben, zonder verliezen en niet beïnvloed door ongelijkheid van de verschillende condensatoren. Zelfs met integratietechnieken is het niet mogelijk om voor dergelijke schakelaars een compact en betaalbaar ontwerp te maken.

We zullen in dit artikel laten zien dat men uit deze impasse kan geraken door het transporteren van het signaal op een principieel andere wijze uit te voeren, en wel door de lading niet te verplaatsen in de richting van het signaal, maar in tegenovergestelde richting. We gaan hierbij weer uit van de situatie in fig. 1*a* waarin de condensatoren met even nummer een signaalwaarde bevatten (we beperken ons hier tot positieve waarden). De oneven condensatoren, die geen signaal bevatten, zijn nu echter niet „leeg", maar ze zijn „vol", d.w.z. opgeladen tot een bepaalde referentiespanning die hoger is dan de signaalspanningen. Het doorschuiven van de informatie gebeurt nu door vanuit deze „volle" condensatoren lading naar *links* te verplaatsen, totdat de even condensatoren op hun beurt „vol" zijn. Het is duidelijk dat de ladingen die hierna in de oneven condensatoren zijn overgebleven, gelijk zijn aan de ladingen die oorspronkelijk in de eraan voorafgaande even condensatoren waren opgeslagen, zodat het signaal over een afstand van één condensator naar rechts is verschoven.

Voeren we het emmertjesgeheugen uit volgens dit nieuwe principe, dan kunnen we voor de „schakelaars" volstaan met slechts één transistor per cel [5]. Het geheel leent zich nu zeer goed voor integratie; zo kan een compleet schuifregister van b.v. 72 cellen als monolithische schakeling worden uitgevoerd. Hiermee is de mogelijkheid ontstaan om een goedkope en compacte vertragingslijn voor analoge signalen te maken, met een lage vervorming, een variabele vertragingstijd en een hoge waarde voor het produkt $B\tau$. Behalve als vertragingslijn kan dit emmertjesgeheugen ook voor een aantal andere vormen van analoge signaalverwerking een aanzienlijke vereenvoudiging opleveren.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info
11/14/2023

De schakeling van het emmertjesgeheugen

De werking van het emmertjesgeheugen volgens het nieuwe systeem zullen we nu bespreken aan de hand van het principeschema van *fig. 2*. We zien hierin dat elke cel van het register bestaat uit een *NPN*-transistor en een condensator. Deze geheugencondensatoren zijn genummerd C_1, C_2, enz.; C_i is de ingangscondensator. Alle condensatoren zijn even groot en hebben

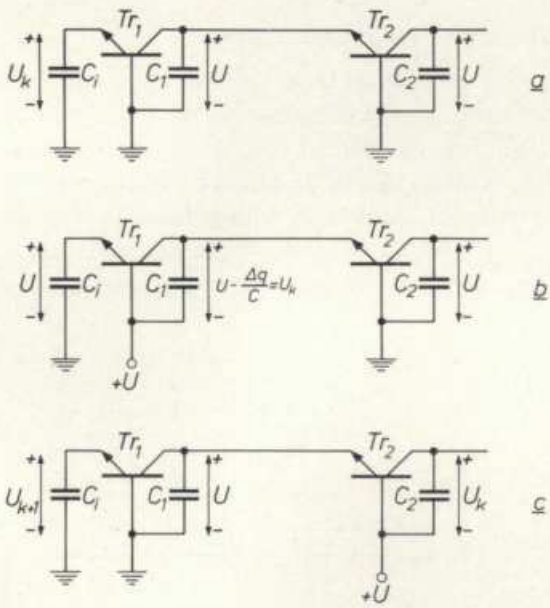

Fig. 2. Principeschakeling van het emmertjesgeheugen volgens het nieuwe systeem. Elke cel van het register bestaat uit een *NPN*-transistor en een condensator. Als een cel geen signaalwaarde bevat, staat op de geheugencondensator een spanning U. De bemonsterde signaalwaarden, de spanningen U_k ($k = 1, 2, \ldots$) worden op de ingangscondensator C_i gebracht (*a*). Om een signaalwaarde door te schuiven naar de eerste cel, wordt de basis van Tr_1 op de potentiaal $+U$ gebracht. Tr_1 gaat dan geleiden totdat zoveel lading (Δq) uit C_1 naar C_i is gevloeid, dat de potentiaal op C_1 ook $+U$ is geworden (*b*). Als alle condensatoren even groot zijn, is de spanning op C_1 hiermee gedaald tot $U - \Delta q/C = U_k$. Op dezelfde wijze wordt U_k doorgeschoven naar C_2 door de basis van Tr_2 op de potentiaal $+U$ te brengen (*c*). Tegelijkertijd wordt dan de volgende bemonsterde waarde U_{k+1} aan C_i toegevoerd, waarmee een periode van het schuifproces is voltooid.

de waarde C. De bemonsterde signaalwaarden die achtereenvolgens in de vorm van spanningen op C_i verschijnen, duiden we aan met U_k ($k = 1, 2, \ldots$). Door bij het te vertragen wisselspanningssignaal een bepaalde gelijkspanning op te tellen, is ervoor gezorgd dat alle spanningen U_k positief zijn, maar lager dan een vaste referentiespanning $+U$.

We gaan uit van de situatie in fig. 2*a*, waarbij C_i een signaalwaarde U_k bevat, en op C_1 en C_2 de spanning $+U$ staat. Doordat de bases van Tr_1 en Tr_2 geaard zijn, geleiden deze transistors niet en blijven de spanningen op de condensatoren staan. Om de informatie van C_i over te brengen naar C_1 wordt nu de basis van Tr_1 op de potentiaal $+U$ gebracht, terwijl de basis van Tr_2 geaard blijft (fig. 2*b*). Tr_1 gaat nu geleiden, want de basis-emissorspanning is positief, aangezien $U > U_k$ is. Er kan nu positieve lading uit C_1, waarvan de bovenzijde op de spanning $2U$ is gekomen, naar C_i vloeien, en wel totdat de spanning over C_i gelijk is geworden aan U (verminderd met een kleine restspanning over de basis-emissorkeerlaag van de transistor, die we in onze beschouwingen zullen verwaarlozen). De basis van Tr_1 wordt daarna teruggebracht op aardpotentiaal. Noemen we de hoeveelheid verplaatste lading Δq, dan geldt: $\Delta q = C(U - U_k)$; op C_1 resteert nu een spanning $U - \Delta q/C$, die gelijk is aan de signaalwaarde U_k. (De invloed van de basisstroom, die hier is verwaarloosd, zullen we later behandelen.)

Als tweede stap wordt de basis van Tr_2 op de potentiaal U gebracht (fig. 2*c*), Tr_2 gaat dan geleiden en de lading Δq die uit C_1 was weggevloeid, wordt vanuit C_2 weer aangevuld. Daarna staat op C_1 weer de spanning U, terwijl de spanning U_k nu op C_2 staat. Hiermee is één periode van het schuifproces voltooid. Tegelijk met de tweede stap wordt weer een bemonstering uitgevoerd, zodat de volgende signaalwaarde U_{k+1} op C_i verschijnt.

Bij het laden van een geheugencondensator wordt in werkelijkheid de spanning $+U$ niet geheel bereikt. In serie met de condensator staat nl. steeds een transistor, en de niet-lineaire weerstand van de basis-emissorkeerlaag hiervan bepaalt het oplaadproces. Zolang de spanning V_C op de condensator laag is en de basis-emissorspanning $V_{be} = U - V_C$ dus hoog, is de weerstand van deze keerlaag zeer gering, zodat het opladen begint met een kleine *RC*-tijd. Naarmate V_C nu stijgt, en V_{be} daalt, neemt echter als gevolg van het exponentiële verloop van de I_e, V_{be}-karakteristiek de weerstand snel toe. Als V_{be} de kniespanning van de grafiek op lineaire schaal (de drempelspanning van de transistor) nadert, wordt de weerstand zo groot dat V_C vrijwel niet meer toeneemt. Onderbreken we nu het oplaadproces door de basis van de transistor op aardpotentiaal te brengen, dan is de spanning op de condensator gelijk aan $U - V_j$, waarin de restspanning V_j over de keerlaag iets groter is dan de drempelspanning. Dit betekent dat de referentiespanning op de condensator bij het overnemen van de volgende signaalwaarde niet U is, maar $U - V_j$.

De laadstroom wordt aan het eind van het oplaadproces wel klein (1 μA tot 1 nA), maar niet geheel nul, zodat de exacte waarde van V_j (400 à 600 mV) afhankelijk is van de tijdsduur en dus van de schuiffrequentie van het emmertjesgeheugen. Bovendien is bij hoge schuiffrequenties V_j enigszins afhankelijk van de spanning die vóór het opladen op de condensator stond, dus van de verplaatste signaalwaarde. Hierdoor blijft in het

[4] Zie C. E. Shannon, A mathematical theory of communication, Bell Syst. tech. J. **27**, 379-423 en 623-656, 1948, en W. G. Tuller, Proc. I.R.E. **37**, 468, 1949.

[5] F. L. J. Sangster en K. Teer, Bucket-brigade electronics — new possibilities for delay, time-axis conversion, and scanning, IEEE J. Solid-State Circuits **SC-4**, 131-136, 1969 (no. 3).
F. L. J. Sangster, Integrated MOS and bipolar analog delay lines using bucket-brigade capacitor storage, 1970 IEEE Int. Solid-State Circuits Conf., blz. 74, 75, 185.

Digitized in Heiloo the Netherlands
Not for sale!

www.freeservicemanuals.info

11/14/2023

referentieniveau een zeker residu van deze signaalwaarde over, waardoor overspraak tussen opeenvolgende signaalwaarden optreedt; dit geeft een verzwakking bij hoge signaalfrequenties. Hetzelfde verschijnsel treedt ook op door de interne terugwerking van de collectorspanning op de emissorspanning in de transistor als gevolg van het „Early"-effect. Een en ander zullen we in dit artikel verder niet behandelen.

Eenvoudigheidshalve zullen we ook in onze verdere beschouwingen blijven aannemen dat alle geheugencondensatoren even groot zijn, hoewel dit in de praktijk meestal niet nodig is. Bij vele toepassingen is nl. alleen de spanning op de laatste condensator van belang, en niet de tussenliggende waarden. Aangezien de hoeveelheid lading die wordt verplaatst, wordt bepaald door de grootte van de ingangscondensator, en verder niet afhankelijk is van de grootte van de andere condensatoren, is het dus meestal voldoende als alleen de uitgangscondensator gelijk is aan de ingangscondensator.

Bij de eenvoudigste uitvoering van het emmertjesgeheugen worden de spanningen aan de bases van de transistors toegevoerd in de vorm van twee zg. schuifspanningen. *Fig. 3a* toont drie cellen van deze schakeling; fig. 3*b* geeft de schuifspanningen, gevormd door de twee complementaire blokspanningen Φ_1 en Φ_2. Verder geeft deze figuur het verloop weer van de potentialen V_1, V_2 en V_3 aan de collectors van de transistors, m.a.w. de spanningen op de geheugencondensatoren ten opzichte van aardpotentiaal. We zien in deze laatste grafieken dat b.v. de potentiaal V_2 op het moment dat Φ_2 positief wordt, eerst snel stijgt tot de waarde $+2U$, en dan daalt doordat er lading van C_2 naar C_1 vloeit. De eindwaarde van V_2 is dan $U + U_k$, waarbij U_k de signaalwaarde is die uit C_1 is overgenomen. Wordt Φ_2 weer nul, dan daalt V_2 tot U_k, maar tegelijkertijd wordt Φ_1 positief zodat nu C_3 lading gaat leveren aan C_2, waardoor V_2 weer stijgt tot de potentiaal U en V_3 op zijn beurt daalt tot de waarde $U + U_k$. Tegelijkertijd neemt C_1 de volgende signaalwaarde U_{k+1} van de eraan voorafgaande cel over, zodat als Φ_1 nul wordt de waarde U_k is overgebracht van C_1 naar C_3 en er weer een nieuwe waarde U_{k+1} in C_1 aanwezig is.

Vergeleken met de schakelingen voor analogon-schuifregisters die tot nog toe beschikbaar waren, is de schakeling van fig. 3 uitermate eenvoudig. Zij leent zich ook goed voor uitvoering als geïntegreerde schakeling; in feite is hierbij per cel van het register alleen een transistor nodig, want de condensator kan eenvoudig worden verkregen door de transistor een grotere collector-basiscapaciteit te geven. Zoals we later nog zullen bespreken, kan de schakeling ook goed met MOS-transistors worden uitgevoerd en biedt dit zelfs bepaalde voordelen boven een uitvoering met bipolaire transistors. De laatste jaren zijn er enige verwante schakelingen beschreven [6], maar deze zijn wat vervorming en integreerbaarheid betreft minder aantrekkelijk dan de hier besproken schakeling.

De schakelingen die het bemonsteren verzorgen en die aan het eind van het schuifregister het uitgangssignaal leveren, worden eveneens gestuurd door de schuifspanningen Φ_1 en Φ_2. We zullen deze schakelingen later in dit artikel bespreken en nu eerst aandacht besteden aan de signaalvervorming die optreedt als gevolg van de basisstroom in de transistors.

De invloed van de basisstroom

Als in fig. 2 de basis van Tr_1 op de spanning U is gebracht, wordt de lading die naar de condensator C_1 vloeit, niet uitsluitend onttrokken aan C_1. Doordat er een basisstroom in de transistor gaat lopen, stroomt tevens een kleine hoeveelheid lading vanuit de basis naar C_1. Aan C_1 wordt dus iets minder lading onttrokken dan aan C_1 wordt toegevoerd; Δq ondergaat hierdoor

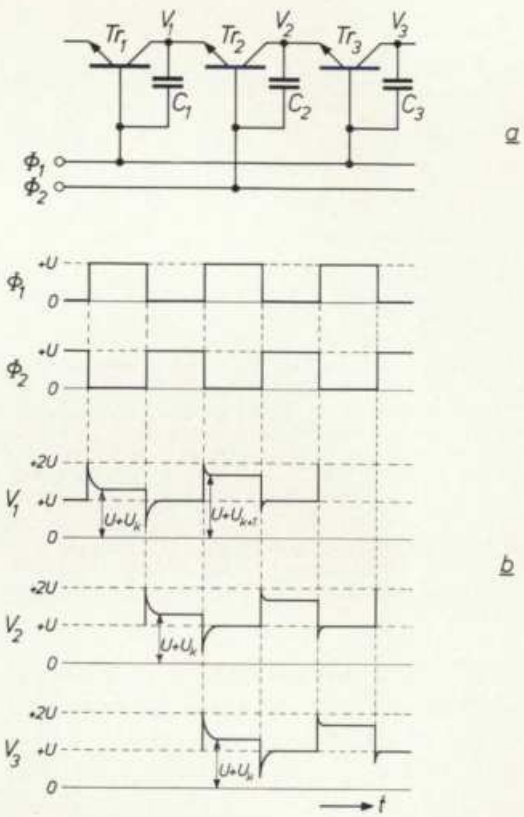

Fig. 3. *a*) Drie cellen van de eenvoudigste schakeling van het emmertjesgeheugen, waarbij twee schuifspanningen worden toegepast. *b*) De schuifspanningen Φ_1 en Φ_2, bestaande uit twee complementaire blokspanningen, en de spanningen V_1, V_2 en V_3 op de geheugencondensatoren van de cellen tijdens het doorschuiven van een signaalwaarde U_k. Steeds als de basis van een transistor op de spanning $+U$ komt, gaat de transistor geleiden en stroomt lading uit de bijbehorende condensator naar de voorafgaande cel totdat deze op de spanning $+U$ is. De spanning op de cel zelf stijgt even tot $2U$ en daalt daarna door het ladingsverlies tot de waarde die de voorafgaande cel had $(U + U_k)$, waarmee de informatie van deze cel is overgenomen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

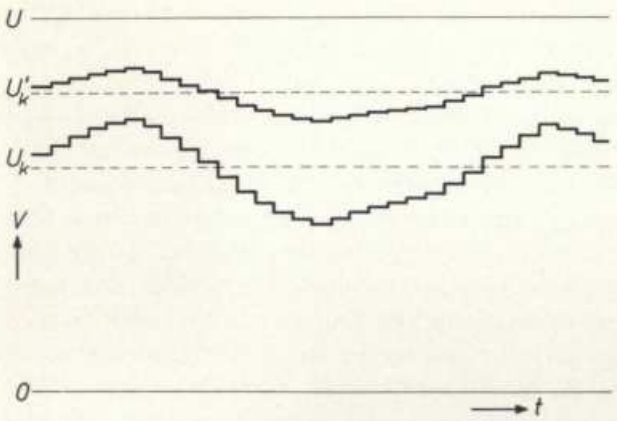

Fig. 4. Ter illustratie van de invloed van de basisstroom in de transistors. Het bemonsterde signaal U_k dat aan het emmertjesgeheugen wordt toegevoerd, bestaat uit een gelijkspanning met daarop gesuperponeerd het te vertragen wisselspanningssignaal. Na passage door een groot aantal cellen heeft het signaal de vorm van U_k' gekregen. In elke cel is nl. als gevolg van de basisstroom de hoeveelheid verplaatste lading iets verkleind, waardoor $U - U_k$ is afgenomen. We zien in de figuur dat dit leidt tot een verzwakking van het wisselspanningssignaal.

tijdens het schuiven in elke cel een kleine verzwakking. Dit betekent dat tijdens het transport door het emmertjesgeheugen de signaalwaarde $U_k = U - \Delta q/C$ steeds dichter bij U komt. Het wisselspanningsgedeelte van U_k, dat immers het te vertragen signaal vormt, wordt hierbij steeds kleiner. We zien dit geïllustreerd in *fig. 4*, waarin een signaal is weergegeven vóór en na het transport door een aantal cellen. Op den duur zal het signaal zelfs geheel verdwijnen, namelijk als $U - U_k$ kleiner is geworden dan de drempelspanning van de transistors; deze komen dan niet meer in geleiding en de spanning op de volgende cellen blijft U.

Om een inzicht te krijgen in de grootte van de signaalverzwakking kunnen we de verzwakking van Δq per cel uitdrukken in de versterkingsfactor β van de transistors; deze verzwakking is dan $i_e/i_c = 1 + 1/\beta$. Na

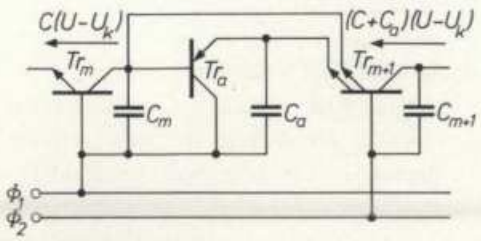

Fig. 5. Versterktrap, die, telkens na een aantal cellen van het emmertjesgeheugen, wordt tussengevoegd om de vermindering van de verplaatste lading te compenseren, die ontstaat door de basisstroom in de cellen. Als Φ_1 positief is en de signaalwaarde U_k in cel m verschijnt, wordt een hoeveelheid lading $C(U - U_k)$ naar cel $(m - 1)$ verplaatst. Aangezien Tr_a als emissorvolger is geschakeld met Φ_1 als voedingsspanning, krijgt C_a dezelfde spanning als C_m. Wordt nu Φ_2 positief, dan wordt via de twee emissors van Tr_{m+1} met lading uit C_{m+1} zowel C_m als C_a opgeladen, zodat nu een lading $(C + C_a)(U - U_k)$ wordt verplaatst. De verplaatste lading is dus vermenigvuldigd met de factor $(C + C_a)/C$.

β cellen is deze factor $(1 + 1/\beta)^\beta$; dit aantal van β cellen is gekozen omdat $(1 + 1/\beta)^\beta$ voor $\beta \to \infty$ een bekende limiet heeft, nl. e. Aangezien β in de praktijk zeker 100 zal bedragen, is deze limiet hier redelijk benaderd en mogen we stellen dat na β overdrachten Δq is verzwakt met een factor e (ongeveer 9 dB).

Bij emmertjesgeheugens van 10 à 20 cellen zal het meestal niet nodig zijn om deze verzwakking te compenseren, maar bij grote aantallen cellen, waarbij het signaal op den duur verloren zou gaan, is dit wel nodig. De compensatie kan heel eenvoudig worden uitgevoerd door steeds na een aantal cellen een versterktrap tussen te voegen, die de hoeveelheid verplaatste lading weer op de juiste waarde brengt. *Fig. 5* toont een dergelijke schakeling, geplaatst tussen de cellen met rangnummer m en $m + 1$. Als in deze schakeling Φ_1 positief wordt, krijgt C_m een signaalwaarde toegevoerd, b.v. U_k. De spanning over C_m daalt dan van U naar U_k, waarbij een lading $C(U - U_k)$ vanuit C_m naar de voorafgaande cel $(m - 1)$ stroomt. De spanning van C_m wordt toegevoerd aan de basis van een *PNP*-transistor Tr_a, die als emissorvolger is geschakeld met Φ_1 als voedingsspanning. Over de condensator C_a komt hierdoor dezelfde spanning U_k te staan als over C_m (we verwaarlozen weer de restspanning over de basis-emissorkeerlaag). De condensator C_a is tevens verbonden met een tweede emissor van de transistor van cel $(m + 1)$. Wordt nu Φ_1 nul en Φ_2 positief, dan gaat deze transistor geleiden en C_{m+1} gaat zich ontladen om de waarde U_k over te nemen. Er stroomt dan echter niet alleen lading naar C_m, maar ook naar C_a, en wel tot deze beide condensatoren weer op de spanning U zijn [7]. Uit C_{m+1} stroomt hierdoor een hoeveelheid lading $(C + C_a)(U - U_k)$ weg, zodat Δq is vermenigvuldigd met een factor $(C + C_a)/C$. Als de versterktrap na β cellen is tussengevoegd, moet dus gelden $(C + C_a)/C = e$, zodat C_a gelijk moet zijn aan $(e - 1)C$.

De bemonsteringsschakeling

Aan de eerste cel van het emmertjesgeheugen moeten de bemonsterde signaalwaarden worden toegevoerd. Hiervoor zorgt de schakeling van *fig. 6a*. Het signaal

[6] G. Krause, Analog-Speicherkette: eine neuartige Schaltung zum Speichern und Verzögern von Signalen, Electronics Letters **3**, 544-546, 1967.
R. A. Mao, K. R. Keller en R. W. Ahrons, Integrated MOS analog delay line, 1969 IEEE Int. Solid-State Circuits Conf., blz. 164-165.
W. S. Boyle en G. E. Smith, Charge coupled semiconductor devices, Bell Syst. tech. J. **49**, 587-593, 1970 (no. 4).

[7] Hetzelfde resultaat zou kunnen worden bereikt door C_a via een diode met de emissoruitgang van Tr_{m+1} te verbinden. Bij geïntegreerde schakelingen is het maken van een tweede emissorcontact in een transistor echter eenvoudiger dan het maken van een aparte diode. Dergelijke „multi-emissortransistors" worden bij integratie dan ook veel toegepast.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info

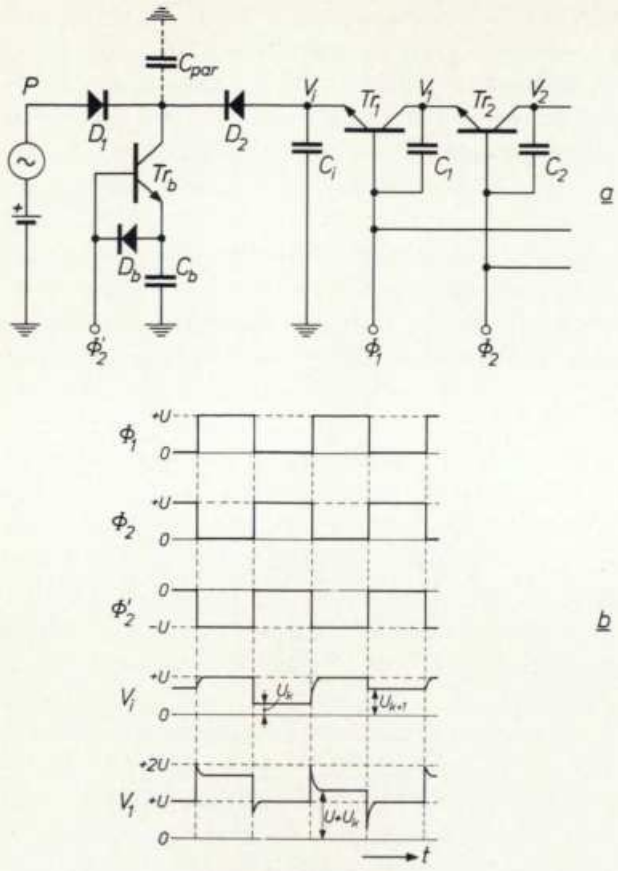

Fig. 6. *a*) Schakeling warmee het signaal wordt bemonsterd en waarmee de bemonsterde waarden worden toegevoerd aan het emmertjesgeheugen. *b*) De blokspanningen Φ_1, Φ_2 en Φ_2' die voor het functioneren van (*a*) nodig zijn, alsmede het verloop van de spanning V_i op condensator C_i en van de spanning V_1 op de eerste cel. Steeds als de spanning Φ_2' van het negatieve naar het nulniveau gaat, komt de transistor Tr_b gedurende een zeer korte tijd in geleiding, waardoor V_i gelijk wordt aan de waarde die de signaalspanning V_P op dat moment heeft. Deze spanning U_k blijft in C_i bewaard totdat Φ_1 positief wordt en de eerste cel van het register de waarde overneemt.

wordt aan de linkerzijde van de schakeling toegevoerd en opgeteld bij een zodanige positieve voorspanning dat de spanning op het punt P zich altijd tussen 0 en U volt bevindt. Deze spanning zullen we verder als het signaal beschouwen. Door het samenspel van de diodes D_1 en D_2 met een soort „buffertrap" die bestaat uit de transistor Tr_b, de condensator C_b en de diode D_b, komen de bemonsterde waarden U_k van dit signaal op de condensator C_i, en wel op zodanige tijdstippen dat de eerste cel van het register ze op de normale wijze, dus op het moment dat Φ_1 positief wordt, kan overnemen. Fig. 6*b* toont de schuifspanningen Φ_1 en Φ_2 en de blokspanning Φ_2' waarmee de buffertrap wordt gestuurd; deze is verkregen door van Φ_2 de gelijkspanning U af te trekken. Tevens toont deze figuur het verloop van de ingangsspanning V_i op de condensator C_i en het verloop van de spanning V_1 op de eerste cel.

De werking van deze bemonsteringsschakeling is als volgt. In de eerste halve periode is Φ_1 positief, Φ_2 op het nulniveau en Φ_2' negatief. De condensator C_i wordt dan vanuit C_1 opgeladen tot de spanning $+U$. De basis van Tr_b is negatief, zodat deze transistor niet geleidt; de diodes D_1 en D_2 verhinderen nu dat er stroom loopt tussen C_i en de signaalbron, zodat V_i constant blijft. Doordat Φ_2' negatief is, wordt de buffercondensator C_b via D_b ontladen tot de spanning $-U$. In de tweede helft van de periode is Φ_2' op het nulniveau. Doordat de negatieve lading op C_b niet kan wegvloeien, is de basis-emissorspanning van Tr_b nu positief zodat Tr_b kan geleiden. Er gaat nu via D_1, D_2 en Tr_b stroom lopen totdat de spanning over C_b weer is gestegen tot dicht bij het nulniveau; over de basis-emissorkeerlaag van Tr_b staat dan nog een kleine restspanning en de stroom is verwaarloosbaar klein geworden.

De laadstroom van de buffercondensator wordt in eerste instantie onttrokken aan C_i, want de spanning U op deze condensator is hoger dan de signaalspanning. Door dit ladingsverlies daalt V_i snel tot de waarde van de signaalspanning op dat moment, waarna de verdere laadstroom wordt geleverd door de signaalbron. V_i kan hierbij niet verder meer dalen, aangezien C_i via de nu geleidende diodes is verbonden met het punt P, en dus op dezelfde potentiaal blijft. Als C_b is opgeladen, zodat de stroom stopt, is C_i weer van de signaalbron gescheiden door D_1 en D_2, zodat V_i gelijk blijft aan de bemonsterde signaalspanning. Deze waarde hebben we in dit artikel aangeduid met U_k ($k = 1, 2, 3, \ldots$).

Door de afwezigheid van weerstanden in de schakeling, gebeurt het bemonsteren zo snel (in enkel nanoseconden) dat de bemonstering nagenoeg samenvalt met de spanningssprong van Φ_2'. De schakeling is hierdoor tot bij zeer hoge frequenties van de schuifspanningen (b.v. 30 MHz) bruikbaar. We zien in fig. 6*b* dat de signaalwaarde U_k op het juiste moment beschikbaar is in C_i; als aan het begin van de volgende periode Φ_1 weer positief wordt, neemt de eerste cel de waarde over door C_i op te laden tot de spanning $+U$.

Een voorwaarde voor de goede werking van de schakeling is dat C_b groot genoeg moet zijn om de maximale hoeveelheid lading op te nemen, niet alleen uit C_i, maar ook uit de parasitaire capaciteit C_{par} (zie fig. 6*a*). Deze ontstaat als de schakeling in geïntegreerde vorm wordt uitgevoerd. De maximale verplaatste lading $U(C_i + C_{par})$ treedt op als de signaalspanning nul is; C_b kan worden opgeladen van $-U$ tot nul, zodat C_b groter moet zijn dan $C_i + C_{par}$.

De schakeling van fig. 6*a* is in feite de helft van de brugschakeling met vier diodes die gewoonlijk als bemonsteringsschakeling wordt gebruikt. De weerstand of impulstransformator in serie met de bron van de bemonsteringsimpulsen is hier vervangen door de buffertrap. Deze oplossing is gekozen omdat nu niet de hoge spanningsimpulsen nodig zijn die voor de brugschakeling zijn vereist.

Digitized in Heiloo the Netherlands
Not for sale!

www.freeservicemanuals.info
11/14/2023

De uitgangsschakeling

De spanning van de laatste cel van het emmertjesgeheugen willen we als uitgangssignaal gebruiken, er zal dus op deze plaats een zeker vermogen door de schakeling moeten kunnen worden geleverd. De geheugencondensatoren zijn echter zeer klein, bij een geïntegreerd emmertjesgeheugen slechts enkele pF, en er kan dus niet rechtstreeks stroom aan de laatste condensator worden onttrokken. Deze geringe belastbaarheid kan uiteraard worden verhoogd door in serie met de laatste cel een emissorvolgers te plaatsen, zoals getoond is in *fig. 7*. Als de weerstand R hierbij voldoende groot wordt gekozen, is de uitgangsspanning V_o gelijk aan de spanning V_n van de laatste cel (uiteraard weer

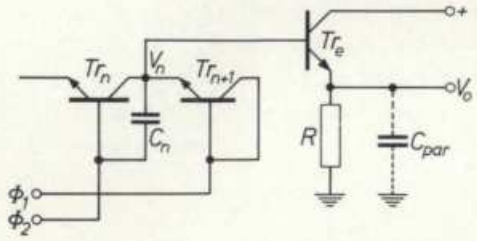

Fig. 7. Uitgangsschakeling waarbij een emissorvolger Tr_e in serie met de laatste cel is geplaatst. De uitgangsspanning V_o van deze schakeling is gelijk aan de spanning V_n van de laatste cel (verminderd met een restspanning V_j van 400 à 600 mV over de basis-emissorkeerlaag). Terwijl C_n door de emissorvolger slechts weinig wordt belast, kan aan de uitgang een veel sterkere stroom worden afgenomen. Doordat bij het dalen van V_o de parasitaire capaciteit C_{par} zich moet ontladen via R is deze schakeling echter slechts in een beperkt frequentiegebied bruikbaar te maken. Bij hoge frequenties moet R nl. klein zijn omdat anders C_{par} zich niet tijdig kan ontladen, bij lage frequenties moet R groot zijn om te verhinderen dat C_n zich via R ontlaadt.

verminderd met de restspanning V_j over de keerlaag) Door de hoge ingangsimpedantie van de emissorvolger wordt C_n slechts weinig belast, terwijl aan de uitgang van de emissorvolger een veel groter vermogen kan worden afgegeven. (De transistor Tr_{n+1} is nodig om C_n steeds weer op te laden tot de spanning U.)

Door de aanwezigheid van een parasitaire capaciteit C_{par} is de schakeling van fig. 7 niet over het gehele frequentiegebied dat bij het emmertjesgeheugen van belang is, bruikbaar. Deze capaciteit moet zich nl. als V_o daalt, ontladen via R; de RC-tijd van deze ontlading kan zo groot zijn dat V_o de spanning V_n niet kan volgen, zodat een vervorming optreedt. Bij hoge schuiffrequenties moet men om dit te vermijden een lage waarde voor R kiezen. Bij lage frequenties moet R echter een hoge waarde hebben, want anders ontstaat vervorming doordat aan C_n teveel stroom wordt onttrokken.

Een schakeling die in een groot frequentiegebied bruikbaar is, ontstaat als de weerstand van de emissorvolger wordt vervangen door twee buffertrappen van het type dat ook in de bemonsteringsschakeling is toegepast. *Fig. 8a* toont de uitgangsschakeling die op deze wijze ontstaat, en die bij het emmertjesgeheugen wordt toegepast; fig. 8*b* geeft de vereiste spanningen alsmede het verloop van V_n en V_o. De werking van de buffertrappen is reeds bij de bemonsteringsschakeling behandeld: de transistor van een dergelijke trap gaat geleiden als de stuurspanning (hier Φ_1' resp. Φ_2') van het negatieve naar het nulniveau gaat; deze stroom stopt weer (wordt in feite verwaarloosbaar klein) als de buffercondensator is geladen. Bij de schakeling van fig. 8*a* betekent dit dat steeds aan het begin van elke halve periode van de schuifspanningen, dus op het moment dat V_n verandert van waarde, één van de transistors Tr_{b1} en Tr_{b2} gaat geleiden. Hierdoor kan

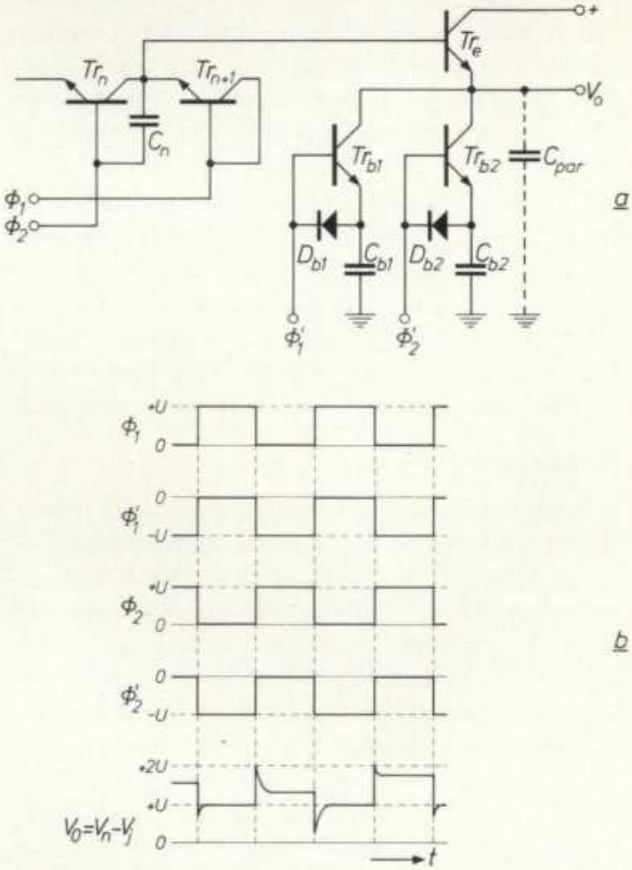

Fig. 8. *a*) Uitgangsschakeling die in een groot frequentiegebied bruikbaar is. *b*) De spanningen die voor het functioneren van (*a*) nodig zijn, alsmede het verloop van de uitgangsspanning V_o. Bij deze schakeling is de weerstand R van de emissorvolger uit fig. 7 vervangen door twee buffertrappen van het type dat in fig. 6*a* is toegepast. Deze worden gestuurd door de spanningen Φ_1' en Φ_2'. Aan het begin van elke halve periode van de schuifspanningen, op het moment dat V_n een nieuwe waarde gaat aannemen, komt de transistor van één van deze buffertrappen in geleiding. Hierdoor kan C_{par} zich zeer snel ontladen, terwijl tevens Tr_e in geleiding komt zodat deze transistor als emissorvolger gaat werken en de uitgangsspanning V_o de spanning V_n volgt (weer is uiteraard $V_o = V_n - V_j$). Door een juiste dimensionering van de buffercondensatoren wordt de stroom onderbroken als V_o en V_n de nieuwe constante waarde hebben bereikt. Gedurende de verdere halve periode wordt geen stroom meer aan C_n onttrokken; ook voor lage frequenties is hiermee voldaan aan de eis van geringe belasting van C_n. Het ontladen van C_{par} en het instellen van een nieuwe waarde van V_o gaat zo snel dat de schakeling ook voor zeer hoge frequenties bruikbaar is.

Digitized in Heiloo the Netherlands
Not for sale!

www.freeservicemanuals.info

C_{par} zich ontladen, terwijl Tr_e in geleiding komt en dus als emissorvolger gaat werken, zodat de uitgangsspanning V_o de spanning V_n volgt. De buffercondensatoren zijn nu zo gedimensioneerd dat het laden van deze condensatoren minstens zo lang duurt als het laden van de geheugencondensator C_n, zodat de stroom door Tr_e pas wordt onderbroken als V_n, en dus ook V_o, de nieuwe waarde heeft bereikt. Deze uitgangsspanning blijft nu tot het eind van deze halve periode gehandhaafd, terwijl aan C_n geen stroom meer wordt ontrokken. De lengte van de periode is hierbij niet van belang; ook bij lage schuiffrequenties levert deze schakeling dus de juiste uitgangsspanning zonder dat C_n teveel wordt belast. Het ontladen van C_{par} en het instellen van een nieuwe waarde van V_o gebeurt zo snel, dat de maximale schuiffrequentie van het emmertjesgeheugen in de praktijk niet door deze uitgangsschakeling wordt bepaald. Meestal vormt de maximale frequentie van de schuifimpulsbron (b.v. 30 MHz) de bovenste grens van het frequentiegebied.

Op deze wijze is een schakeling ontstaan waarbij over een groot frequentiegebied de invloed van C_{par} is opgeheven, zonder dat C_n teveel wordt belast. De uitgangsimpedantie is echter door de aanwezigheid van de buffertrappen nog vrij hoog; om hiervoor de gewenste lage waarde te bereiken, wordt nog een gewone emissorvolger met de schakeling van fig. 8*a* in serie gezet.

De informatiedichtheid

Bij de eenvoudigste uitvoeringsvorm van het emmertjesgeheugen, het type met twee schuifspanningen dat in fig. 3*a* is gegeven, bevat steeds slechts de helft van de geheugencondensatoren een signaalwaarde. De „informatiedichtheid" bedraagt hier dus slechts $\frac{1}{2}$. Een grotere informatiedichtheid kan worden bereikt door de schakeling enigszins te wijzigen en daarbij een ingewikkelder patroon van schuifimpulsen toe te passen. Zo toont *fig. 9a* een gedeelte van een emmertjesgeheugen dat met drie schuifspanningen werkt, nl. Φ_1, Φ_2 en Φ_3 (fig. 9*b*). De werking van deze schakeling verloopt op dezelfde wijze als is beschreven bij fig. 3, met dien verstande dat nu in elke periode van het bemonsteren drie „schuifimpulsen" worden toegevoerd aan groepjes van drie cellen. De spanningen V_1, V_2 en V_3 op de cellen vertonen hierdoor een iets ander verloop dan de overeenkomstige spanningen in fig. 3*b*. Als Φ_1 positief wordt, neemt de eerste cel de signaalwaarde aan, zodat V_1 gelijk wordt aan $U + U_k$. Wordt nu Φ_1 weer nul, dan wordt C_1 niet direct weer opgeladen tot de spanning U, zoals in fig. 3, maar V_1 komt eerst op de waarde U_k, en stijgt pas tot de waarde U als Φ_2 positief wordt en de tweede cel de signaalwaarde overneemt. De eerste cel bevat dus gedurende 2/3 deel van de schuifimpulsperiode een signaalwaarde; bezien we de drie cellen te zamen, dan bevatten er steeds twee van de drie een signaal, zodat de informatiedichtheid 2/3 is.

Volgens dit principe kan men ook met meer dan drie schuifspanningen werken. Bij p spanningen wordt de informatiedichtheid dan $(p-1)/p$. We hebben hierboven reeds besproken dat voor het realiseren van een vertraging τ_0 van een signaal met bandbreedte B een aantal $2B\tau_0$ waarden moeten worden vastgelegd. Bij een informatiedichtheid $(p-1)/p$ van het register zijn hiervoor $2B\tau_0 \cdot p/(p-1)$ cellen nodig. Bij de schakeling van fig. 3, waarbij $p = 2$, zijn dus $4B\tau_0$ cellen nodig; bij schakelingen met grotere waarden van p zijn er minder nodig.

Het werken met een groot aantal schuifspanningen heeft ook enkele nadelen. Doordat de tijd tussen twee bemonsteringen gelijk blijft (deze is immers $\frac{1}{2}B$), en in deze periode p schuifimpulsen moeten verschijnen, worden bij grotere p de impulsen steeds korter en is er ook evenredig minder tijd beschikbaar voor het ladingstransport tussen de condensatoren, dat immers

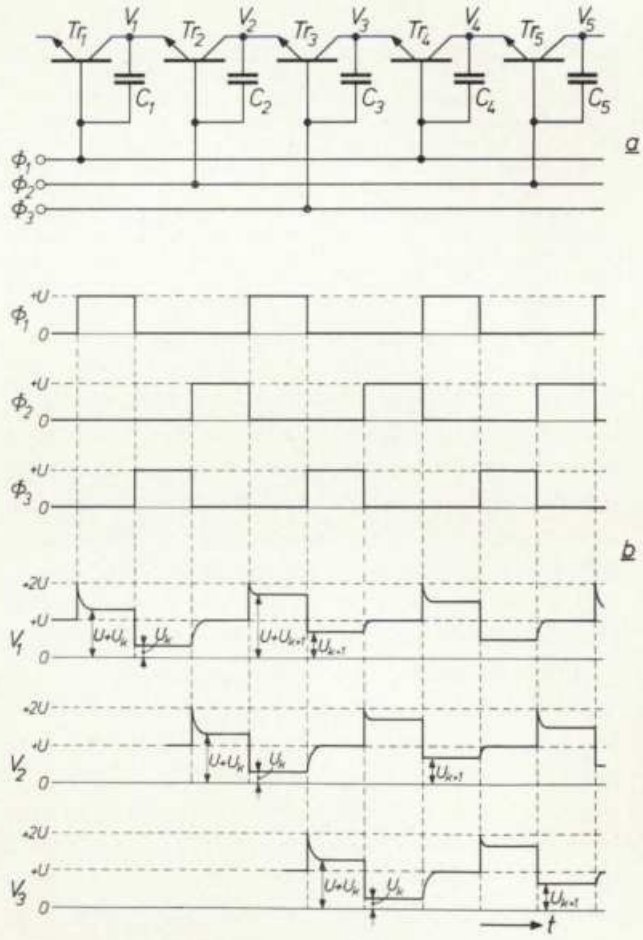

Fig. 9. *a*) Schakeling van een emmertjesgeheugen met grotere informatiedichtheid. *b*) De schuifspanningen Φ_1, Φ_2 en Φ_3, alsmede de spanningen V_1, V_2 en V_3 van de eerste drie cellen. Uit deze laatste grafieken blijkt dat in deze schakeling steeds twee van elke drie cellen een signaalwaarde bevatten. De informatiedichtheid is hier dus 2/3, tegen 1/2 bij de schakeling van fig. 3.

Digitized in Heiloo the Netherlands
Not for sale!

www.freeservicemanuals.info

11/14/2023

binnen de tijd van één impuls moet zijn voltooid. Als de bandbreedte van het signaal groot is, kan dit een grens stellen aan p. Een tweede nadeel is dat voor het opwekken van de schuifspanningen een schuifregister extra nodig is met p paralleluitgangen, terwijl hiervoor bij de basisschakeling met een eenvoudige bistabiele schakeling kan worden volstaan. Ten derde ontstaan er in de schakeling meer kruisende lijnen (zie fig. 9*a*), wat bij de uitvoering als monolithische schakeling technologische moeilijkheden oplevert. De keuze van p zal dan ook afhankelijk zijn van de aard van de toepassing van het emmertjesgeheugen en van de technologische mogelijkheden.

Aan het eerstgenoemde bezwaar van een grote waarde van p, nl. de korte tijd die beschikbaar is voor het ladingstransport, kan tegemoet worden gekomen door de cellen niet in één keten te plaatsen, maar in p ketens parallel. De ingangscellen worden dan alle met de bemonsteringsschakeling verbonden en de schuifimpulsen worden op een zodanige wijze aan de ketens toegevoerd dat opvolgende signaalwaarden over de ketens worden verdeeld. Elke keten behoeft dan slechts één uit p signaalwaarden op te slaan; de schuifimpulsen kunnen hierdoor p maal zo lang zijn, zodat p maal zoveel tijd beschikbaar is voor het ladingstransport. Een bijkomend voordeel is nog dat elke signaalwaarde slechts $1/p$ maal het oorspronkelijke aantal cellen behoeft te passeren, zodat de vervorming aanzienlijk minder is. Hiertegenover staat het bezwaar dat een eventuele ongelijkheid van de verschillende ketens zich na het samenvoegen van de signaalwaarden zal uiten als een stoorsignaal.

Het emmertjesgeheugen als geïntegreerde schakeling

De verschillende typen van het emmertjesgeheugen die in dit artikel zijn beschreven, blijken zeer geschikt te zijn voor de fabricage als monolithische schakeling. We vermeldden reeds dat voor elke cel van een emmertjesgeheugen slechts één transistor nodig is; *fig. 10a* geeft een doorsnede van een dergelijke transistor [8]. De geheugencondensator, die zich immers tussen de basis en de collector bevindt, wordt gevormd door de capaciteit van de keerlaag tussen de P-basis en de N^+-collectorcontactlaag (die speciaal hiervoor is vergroot), te zamen met de zg. „Miller-capaciteit" C_{eb} tussen de collector en de basis. De totale waarde van de capaciteit bedraagt ongeveer 2,5 pF. In fig. 10*b* is een bovenaanzicht geschetst. Hier is de vergrote N^+-laag van de collector duidelijk zichtbaar; deze strekt zich over een veel groter gebied uit dan in fig. 10*a* zichtbaar is. *Fig. 11* toont een foto van de eerste experimentele schakeling, waarbij op een kristalplaatje 16 van deze cellen zijn aangebracht in vier ketens van vier cellen (dus voor gebruik met vier schuifspanningen).

Van de overige parasitaire capaciteiten werken de collector-substraatcapaciteit en de emissor-basiscapaciteit als spanningsdeler voor de schuifspanning en als extra-delen van de geheugencapaciteit, zodat deze capaciteiten geen moeilijkheden opleveren. Anders is

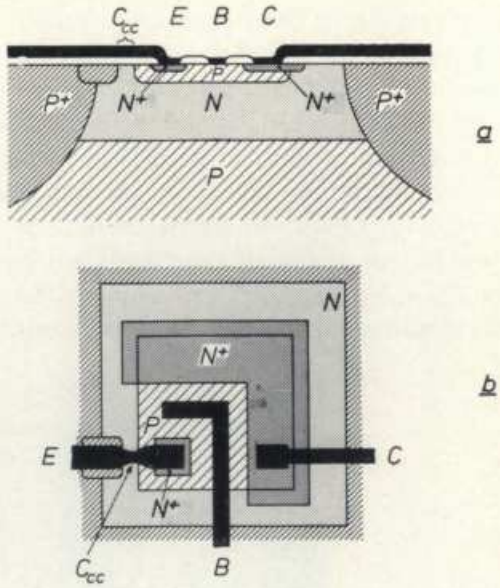

Fig. 10. Doorsnede (*a*) en bovenaanzicht (*b*) van een cel van een emmertjesgeheugen uitgevoerd als monolithische schakeling. In een substraat van P-silicium wordt uit een epitaxiale laag van N-silicium een eiland van de omgeving geïsoleerd door P^+-diffusies. In dit N-gebied is een NPN-transistor aangebracht, waarbij de N^+-diffusie van het collectorcontact zo groot is gemaakt dat deze diffusie een groot deel van de basisdiffusie bedekt. De keerlaag tussen deze diffusies dient namelijk samen met de parasitaire capaciteit tussen basis en collector als geheugencondensator van de cel. De aluminiumaansluitingen van basis, emissor en collector zijn in de figuren zwart weergegeven, het oxide wit. Een extra-gebiedje P-materiaal onder de emissoraansluiting dient om de parasitaire capaciteit C_{ee} klein te maken.

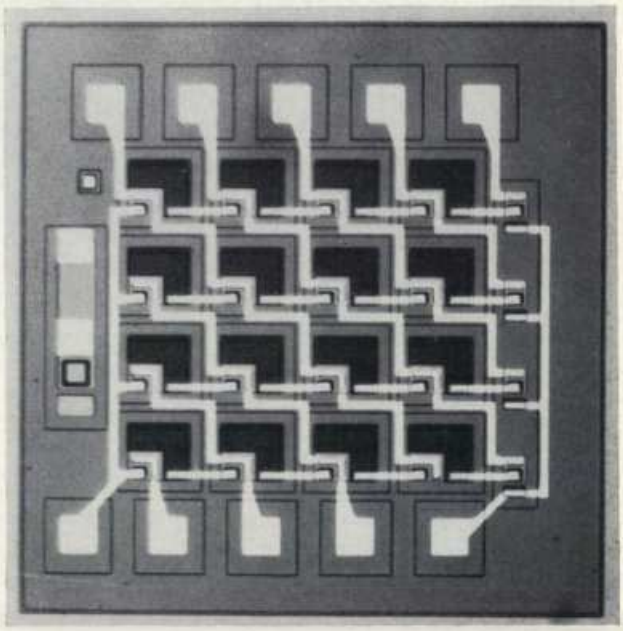

Fig. 11. Eerste experimentele uitvoering van een geïntegreerd emmertjesgeheugen met 16 cellen, gerangschikt in vier rijen van vier cellen. Afmetingen van het kristalplaatje 1,25×1,25 mm. Op deze foto is de vorm van fig. 10*b* duidelijk te herkennen. Opeenvolgende transistors worden rechtstreeks verbonden door de aluminiumstrips van de collector en de emissor (aluminium wordt op de foto wit weergegeven). De bases zijn volgens een bepaald patroon doorverbonden om de vier schuifspanningen toe te voeren.

[8] Het ontwerp voor de geïntegreerde schakeling is tot stand gekomen met medewerking van ir. C. Mulder van dit laboratorium.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info
11/14/2023

het gesteld met de collector-emissorcapaciteit C_{ce}; deze overbrugt nl. de transistor en vormt zo een directe koppeling tussen opvolgende signaalwaarden, wat een vervorming van de signaalsprongen geeft. De collector-emissorcapaciteit ontstaat doordat de aluminiumstrip die twee transistors verbindt, en die verbonden is met de emissor van één van deze transistors, het N-gebied kruist dat tot de collector van deze transistor behoort (zie C_{ce} in fig. 10). Door de aluminiumstrip en de desbetreffende strook N-materiaal ter plaatse zo smal mo-

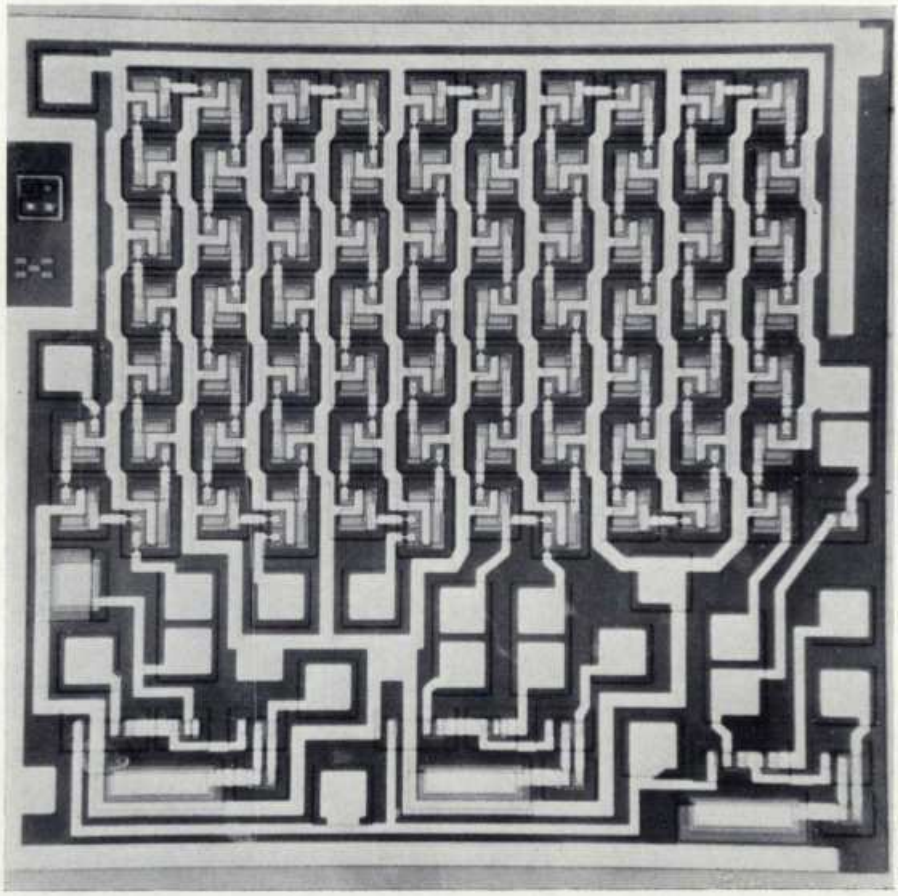

Fig. 12. Geïntegreerd emmertjesgeheugen met 72 cellen, waarbij op het kristalplaatje tevens een versterktrap, een ingangs- en een uitgangsschakeling zijn aangebracht. Afmetingen van het kristalplaatje 2×2 mm.

gelijk te maken en bovendien met een extra-gebiedje P-materiaal het N-materiaal ter plaatse in te snoeren, kan men de oppervlakte van de kruising beperken tot 2,5×5 μm, waarbij de capaciteit minder dan 0,001 pF bedraagt. De vervorming als gevolg van deze capaciteit begint dan eerst na enige honderden cellen merkbaar te worden.

Voor praktische toepassing van het emmertjesgeheugen is het uiteraard wenselijk om op één kristalplaatje een groot aantal cellen te zamen met alle hulpschakelingen onder te brengen. *Fig. 12* toont een dergelijke geïntegreerde schakeling, die 72 cellen (gekoppeld op de wijze van fig. 3), een versterktrap, een bemonsterings- en een uitgangsschakeling bevat. Deze geïntegreerde schakelingen kunnen weer in serie worden gezet om een nog langere vertragingslijn te maken. Zo is met vier van deze elementen een vertragingslijn gemaakt, die dus 288 cellen telt. Een signaal met bandbreedte B kan in deze schakeling dus een vertraging τ_0 ondergaan waarvoor geldt dat $B\tau_0 = 72$. De minimaal bereikbare vertraging volgt uit de maximaal toelaatbare schuiffrequentie; deze is ongeveer 30 MHz. De bemonsteringsfrequentie is dus eveneens maximaal 30 MHz, wat overeenkomt met een maximale bandbreedte van 15 MHz. De kleinste vertraging is dus ongeveer 5 μs. De maximaal bereikbare tijdsvertraging wordt bepaald door de lekstromen in de transistors, waardoor de schuiffrequentie in het algemeen niet mag dalen tot onder enkele tientallen kHz. De minimale bandbreedte is b.v. 15 kHz en de grootste vertraging 5 ms. Tussen 5 μs en 5 ms kan de vertraging continu worden gevarieerd door de schuiffrequentie te variëren.

Ter illustratie van de geringe vervorming van deze vertragingslijn, toont *fig. 13* een televisiebeeld waarbij een signaal dat in de linkerstrook rechtstreeks is weergegeven, in de volgende stroken wordt getoond na

Digitized in Heiloo the Netherlands
Not for sale!

www.freeservicemanuals.info

11/14/2023

Fig. 13. Televisiebeeld waarbij, ter illustratie van de geringe vervorming door het emmertjesgeheugen, het signaal in de verschillende delen van het beeld steeds meer cellen heeft doorlopen. Links is het signaal rechtstreeks weergegeven; in de tweede strook is het vertraagd door vier geïntegreerde schakelingen van het type van fig. 12 (totaal 288 cellen). In de derde strook heeft het signaal acht van deze schakelingen doorlopen en in de vierde strook twaalf. De scherpte van het beeld is slechts weinig afgenomen.

er bij MOS-transistors geen stroom naar de stuurelektrode loopt, treedt bij het ladingstransport geen verlies op, zodat er geen versterkers nodig zijn. Ook de ingangs- en de uitgangsschakelingen kunnen bij MOS-emmertjesgeheugens veel eenvoudiger zijn.

Fig. 14 toont een schema van een compleet MOS-emmertjesgeheugen. Het is opgebouwd uit MOS-transistors met *P*-kanaal, zodat de schuifspanningen Φ_1 en Φ_2 negatief moeten zijn. Het doorgeven van de informatie tussen de cellen gebeurt op dezelfde wijze als in het bipolaire geval. Het bemonsteren gebeurt echter op een ander tijdstip. Wordt nl. Φ_2 negatief, dan gaat Tr_1 geleiden, zodat de spanning op C_1 gelijk wordt aan het signaal, en hieraan ook gelijk blijft totdat Φ_2 weer nul wordt. De signaalwaarde van dat laatste tijdstip blijft dus als bemonstering op C_1 bewaard, terwijl in het bipolaire geval wordt bemonsterd op het moment dat Φ_2 positief wordt. Bij de uitgangsschakeling kan worden volstaan met het aequivalent van de emissorvolger (source-follower); ook weer wegens het ontbreken van een stuurstroom wordt aan C_n nl. geen stroom ont-

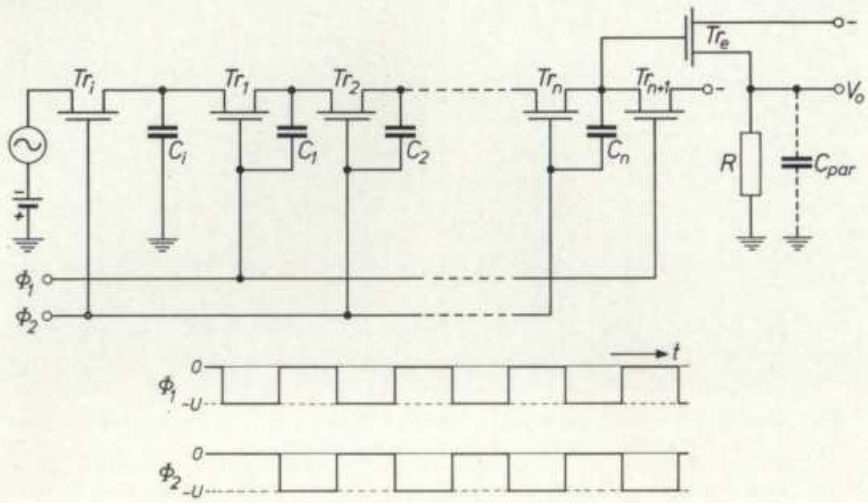

Fig. 14. Schakeling van een emmertjesgeheugen met MOS-transistors met *P*-kanaal. Doordat bij MOS-transistors geen stroom loopt naar de stuurelektrode, kunnen de ingangs- en de uitgangsschakeling veel eenvoudiger zijn dan bij de uitvoering met bipolaire transistors.

passage door een steeds groter aantal cellen. In de tweede strook is het signaal door een vertragingslijn met *vier* geïntegreerde schakelingen gevoerd (waarbij $\tau \approx 14$ µs en $B \approx 5$ MHz), in de volgende stroken door *acht* en *twaalf* schakelingen van elk 72 cellen. We zien dat de scherpte van het beeld zelfs na honderden cellen nog maar weinig is afgenomen.

Het emmertjesgeheugen met MOS-transistors

De eerste experimenten met het emmertjesgeheugen zijn uitgevoerd met bipolaire transistors; in sommige opzichten lijkt de MOS-transistor [9] echter beter geschikt voor deze schakeling dan de bipolaire. Doordat trokken. De weerstand *R* hoeft daardoor niet hoog te zijn, zodat van een eventuele parasitaire capaciteit geen hinder wordt ondervonden.

Bij integratie kan het MOS-emmertjesgeheugen een heel eenvoudige vorm hebben, doordat alleen aan de in- en uitgang van een rij cellen een aansluiting aan de toe- resp. afvoerelektrode nodig is, terwijl van de tussenliggende cellen alleen de stuurelektrode bereikbaar moet zijn. *Fig. 15* geeft een doorsnede door een

[9] H. C. de Graaff en H. Koelmans, De dunnelagentransistor, Philips techn. T. **27**, 160-166, 1965/66. Binnenkort zal een speciaal nummer van dit tijdschrift verschijnen dat geheel is gewijd aan de MOS-transistor.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info
11/14/2023

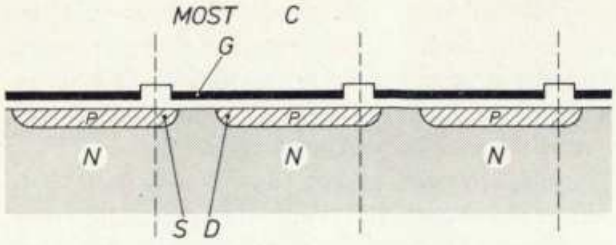

Fig. 15. Doorsnede van een geïntegreerd emmertjesgeheugen samengesteld uit MOS-transistors met *P*-kanaal. In een substraat van type *N* zijn *P*-gebieden gediffundeerd, die tegelijk afvoerelektrode van de ene transistor en toevoerelektrode van de volgende transistor zijn. Het gebied tussen de stippellijnen bevat één cel; links de MOS-transistor met toevoerelektrode *S*, afvoerelektrode *D* en stuurelektrode *G*; rechts de condensator *C* tussen de aluminiumlaag van de stuurelektrode en het *P*-gebied van de afvoerelektrode.

rij de contactpunten *S* en *D* voor de in- en uitgangsspanningen en de punten Φ_1 en Φ_2 waar de schuifspanningen worden toegevoerd. De capaciteit per cel bedraagt in deze uitvoering 8 pF.

Vergelijken we het MOS- en het bipolaire emmertjesgeheugen, dan is de MOS-schakeling veel eenvoudiger en eleganter. Doordat MOS-transistors echter trager schakelen dan bipolaire, is de maximale schuiffrequentie van de MOS-schakeling ongeveer tien maal zo laag — bij de schakeling van fig. 16 ligt het frequentiegebied tussen 100 Hz en 3 MHz. Bovendien moeten bij de MOS-schakelingen de schuifspanningen hoger zijn, omdat een MOS-transistor pas gaat geleiden als de stuurspanning hoger is dan een drempelspanning van

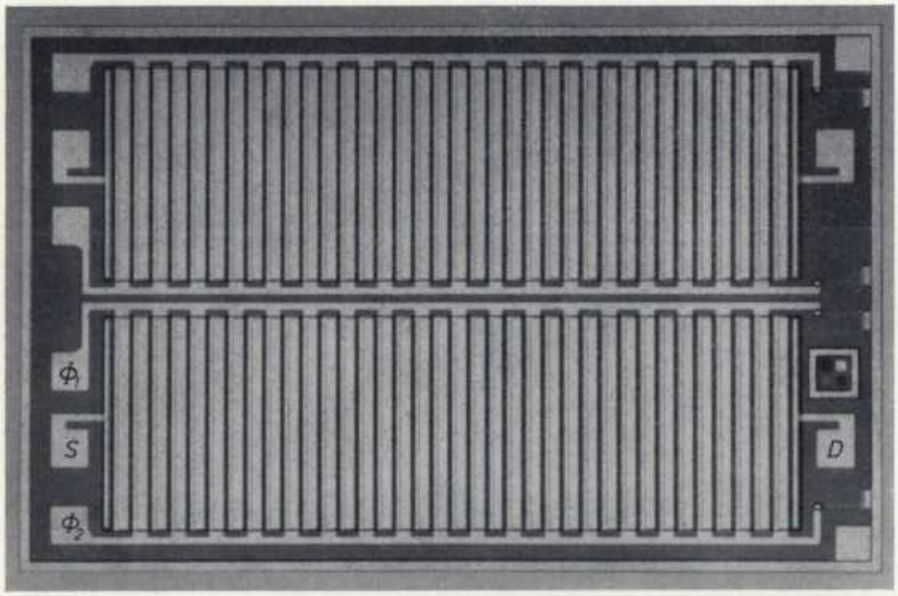

Fig. 16. Geïntegreerde schakeling met twee rijen van 36 cellen van het emmertjesgeheugen in MOS-uitvoering. (De in- en uitgangsschakelingen zijn niet geïntegreerd.) Afmetingen van het kristalplaatje 1,5×2,4 mm. De met aluminium bedekte gebieden zijn op de foto wit, de gebieden waar het oxide zichtbaar is, zijn grijs. In de onderste rij zijn de aansluitpunten aangeduid van de toevoerelektrode *S* van de eerste cel, van de afvoerelektrode *D* van de laatste cel, alsmede de punten waar de schuifspanningen Φ_1 en Φ_2 worden toegevoerd.

dergelijke schakeling [10]. In een substraat van type *N* zijn *P*-gebieden gediffundeerd, die elk dienen als afvoerelektrode van een MOS-transistor en tevens als toevoerelektrode van de volgende. De geheugencondensatoren zijn gevormd door de aluminiumstrips van de stuurelektrodes asymmetrisch te leggen ten opzichte van deze *P*-gebieden, zodat er steeds een capaciteit aanwezig is tussen stuur- en afvoerelektrode. Het gedeelte tussen de twee stippellijnen in fig. 15 omvat dus één cel, met links de MOST en rechts de condensator.

Fig. 16 is een foto van een kristalplaatje waarop twee geïntegreerde MOS-emmertjesgeheugens zijn aangebracht. De in- en uitgangsschakelingen zijn hier niet geïntegreerd; elke rij bevat 36 cellen. We zien aan elke

b.v. 3 volt. Door deze hogere spanningen is de dissipatie van de MOS-schakeling 10 à 20 maal zo hoog als van de bipolaire. Een voordeel is echter weer dat hogere signaalspanningen kunnen worden verwerkt. In het algemeen kunnen we stellen dat de MOS-schakeling zich goed leent voor audio-toepassingen en de bipolaire meer voor video-toepassingen.

Enige toepassingen van het emmertjesgeheugen

De behoefte aan eenvoudige elektronische vertragingslijnen voor analoge signalen in het audio- en in het video-gebied is reeds in de inleiding besproken. We hebben daarna beschreven hoe het emmertjesgeheugen over een zeer breed frequentiegebied in deze behoefte

Digitized in Heiloo the Netherlands
Not for sale!

www.freeservicemanuals.info

11/14/2023

kan voorzien. Hieronder zullen we nog enige speciale voorbeelden geven van elektronische signaalverwerking waarbij het gebruik van het emmertjesgeheugen tot zeer elegante methodes en schakelingen leidt.

De belangrijkste eigenschap van het emmertjesgeheugen als vertragingslijn is ongetwijfeld de mogelijkheid om, door het variëren van de schuiffrequentie, de vertragingstijd binnen een groot gebied continu in te stellen. Dit maakt het emmertjesgeheugen zeer bruikbaar voor systemen waarin *tijdcorrectie* nodig is. We denken hierbij speciaal aan het weergeven van audio- en videosignalen via magneetband, waarbij tijdfouten ontstaan door rek van de band en door variaties in de bandsnelheid [11]. Deze tijdfouten kunnen worden gecorrigeerd door het signaal een emmertjesgeheugen te laten doorlopen, waarvan de schuiffrequentie afhankelijk van deze fouten wordt gevarieerd. De tijdfouten moeten dan worden gemeten aan een referentiesignaal op de band (b.v. een kloksignaal of een lijnsynchronisatiesignaal).

De regelbaarheid van de schuiffrequentie kan ook worden gebruikt om de tijdschaal van een signaal opzettelijk te vervormen, b.v. uit te rekken of in te krimpen. Het televisiebeeld van *fig. 17* geeft een illustratie van deze mogelijkheid. In de linker strook van het beeld is een signaal direct weergegeven. Van elke beeldlijn wordt nu steeds het signaal dat bij deze linker strook behoort, met een schuiffrequentie van 9 MHz ingelezen in een emmertjesgeheugen. Direct daarna wordt dit signaal weer uitgelezen met een frequentie van 3 MHz, en teruggevoerd naar de monitor zodat in het rechter gedeelte van het beeld dit vertraagde signaal wordt weergegeven. De tijdschaal is hier dus met een factor drie uitgerekt; deze factor kan worden gevarieerd door middel van de uitleesfrequentie.

Een praktische toepassingsmogelijkheid van dit principe vinden we bij de telefonie, waar men dikwijls een aantal signalen met geringe bandbreedte wil verzenden over één kanaal met grote bandbreedte. Men kan hiertoe aan elk signaal een emmertjesgeheugen toevoegen en de signalen met een bij de kleine bandbreedte behorende (dus lage) frequentie in deze emmertjesgeheugens inlezen. De verschillende signalen worden nu samengebracht door de emmertjesgeheugens in een vaste volgorde uit te lezen met de hoge frequentie die behoort bij de bandbreedte van het kanaal. Op deze wijze ontstaat een signaal met de gewenste grote bandbreedte, waarin gecomprimeerde stukjes van de signalen op elkaar volgen. Aan de ontvangzijde worden de signalen weer gescheiden door het proces in omgekeerde volgorde uit te voeren. Een dergelijk systeem noemt men een multiplex-systeem met tijdcompressie.

Het emmertjesgeheugen leent zich ook goed voor het vervaardigen van *transversale filters* [12]. Hierbij door-

Fig. 17. Televisiebeeld waarbij het signaal uit de linker strook rechts is weergegeven met een vergrote tijdschaal. Van elke lijn wordt hiertoe het signaal van de linker strook ingelezen in een emmertjesgeheugen, direct daarna met een lagere frequentie weer uitgelezen, en rechts afgebeeld.

loopt een signaal een aantal vertragingselementen; het wordt steeds na een vertraging τ met een bepaalde gewichtsfactor vermenigvuldigd, en deze produkten worden gesommeerd tot een uitgangssignaal. Door de keuze van τ en de gewichtsfactoren kan men het filter elke gewenste frequentie- en fasekarakteristiek geven. Aangezien bij een emmertjesgeheugen het signaal na elke cel bereikbaar is, kan het heel goed als basis voor een dergelijk filter dienen. Het signaal moet uiteraard onverzwakt de keten van vertragingselementen doorlopen; alleen de MOS-schakeling komt hier dus in aanmerking.

De gewichtsfactoren kunnen bij het emmertjesgeheugen op een heel eenvoudige manier worden geïntroduceerd. We maken dan gebruik van de omstandigheid dat bij het verplaatsen van een signaalwaarde van de ene condensator naar de volgende, een hoeveelheid lading die een maat is voor deze signaalwaarde, vanuit de bekrachtigde schuifspanningstoevoer via de twee condensatoren en de MOS-transistor naar de andere schuifspanningstoevoer stroomt. De totale stroom die tijdens het transport aan de schuifspanningsbron wordt onttrokken, is dus een maat voor de som van de verplaatste signaalwaarden. De weegfactoren worden nu geïntroduceerd door van elke twee geheugencondensa-

[10] Het ontwerp voor de geïntegreerde schakeling is tot stand gekomen met medewerking van ir. H. Heyns van dit laboratorium.

[11] W. J. Hannan, J. F. Schanne en D. J. Woywood, Automatic correction of timing errors in magnetic tape recorders, IEEE Trans. **MIL-9**, 246-254, 1965.

[12] H. E. Kallmann, Transversal filters, Proc. I.R.E. **28**, 302-310, 1940; zie ook blz. 74 e.v. in P. J. van Gerwen, Het gebruik van digitale schakelingen bij datatransmissie, Philips techn. T. **30**, 71-82, 1969 (no. 3).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info
11/14/2023

toren er één in twee delen te splitsen. Eén van deze deelcondensatoren wordt op de normale wijze met de schuifspanningsbron verbonden, de andere, die de weegfactor bepaalt, wordt met de uitgang van het filter verbonden. *Fig. 18* toont een dergelijk filter.

Als voorbeeld van een toepassing waarbij het emmertjesgeheugen niet als vertragingslijn wordt gebruikt, noemen we een opneempaneeltje voor lichtbeelden. Het s nl. mogelijk om bij een geïntegreerd emmertjesgeheugen het ladingspatroon niet langs elektrische weg aan te brengen, maar door het belichten van fotogevoelige gedeelten van de cellen[13]. Bij een MOS-emmertjesgeheugen zijn dit de niet door aluminium bedekte gedeelten van de *P-N*-overgangen tussen de afvoerelektrodes en het substraat. Een opneemplaatje met een matrix van $n \times n$ lichtgevoelige punten, wordt dan vervaardigd door op een kristalplaatje een MOS-emmertjesgeheugen aan te brengen met de cellen geplaatst in n rijen van n stuks. Uitgaande van een begintoestand waarin op alle condensatoren een spanning $+U$ staat, wordt dan bij belichting een „ladingsbeeld" gevormd doordat de verschillende condensatoren zich tijdens het belichten meer of minder ontladen. De informatie kan dan worden uitgelezen door snel een reeks schuifimpulsen toe te voeren; er ontstaat dan een overeenkomstig signaal als na aftasten met een elektronenbundel in een opneembuis voor televisie. Aangezien bij deze toepassing uiteraard geen signaalverlies mag optreden, ook niet indien dit af en toe door versterking wordt gecorrigeerd, is alleen de MOS-schakeling hiervoor geschikt.

Vooralsnog is het aantal beeldpunten beperkt. De minimale afmetingen van een beeldpunt zijn met de bestaande MOS-technieken ongeveer 45×60 µm; een matrix met dezelfde resolutie als een televisie-opneembuis, dus met 625×625 beeldpunten zou dan een oppervlak van 30×40 mm innemen, hetgeen op het ogenblik nog niet realiseerbaar is. Wel realiseerbaar zijn paneeltjes van 50×50 beeldpunten, die b.v. gebruikt kunnen worden bij het automatisch lezen van tekens.

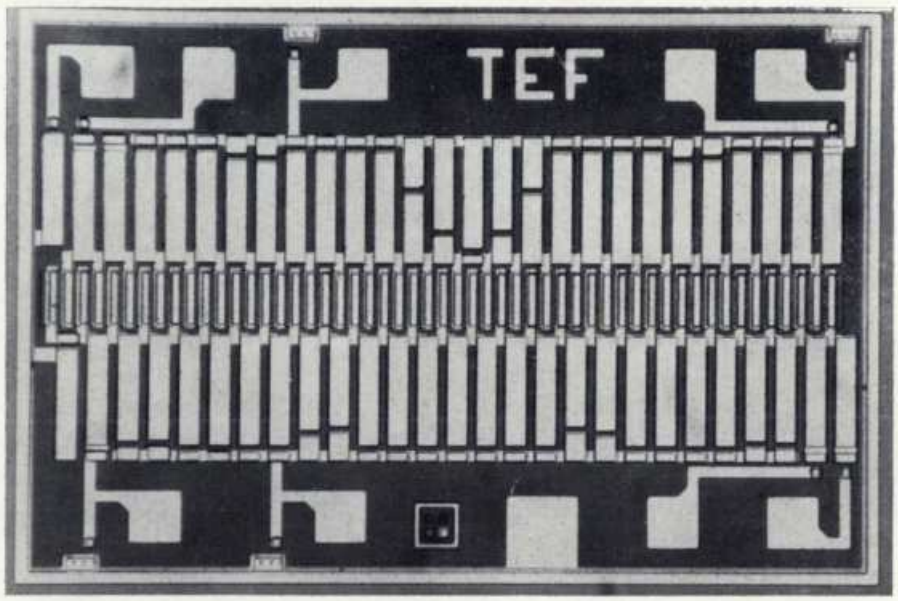

Fig. 18. Transversaal „low pass"-filter, bestaande uit een MOS-emmertjesgeheugen met 52 cellen en 23 aftakkingen. De MOS-transistors bevinden zich in het midden van de afbeelding in een horizontale rij. Erboven en eronder zijn de even en de oneven geheugencondensatoren geplaatst; deze zijn door (donkergrijze) streepjes oxide in tweeën gedeeld en de buitenste delen zijn doorverbonden met de uitgang. Oppervlakte van het kristalplaatje $1{,}2 \times 1{,}8$ mm.

Hoewel het emmertjesgeheugen is ontworpen voor analoge signalen, betekent dit natuurlijk niet dat het geen digitale signalen zou kunnen verwerken. Het emmertjesgeheugen kan zeer goed worden gebruikt in alle gevallen waarin thans een binair schuifregister wordt toegepast. Aangezien de bistabiele schakelingen waaruit een binair schuifregister bestaat, vrij ingewikkeld kunnen zijn, zal toepassing van het emmertjesgeheugen hierbij misschien tot een hogere informatiedichtheid kunnen leiden.

[13] Deze toepassing is voorgesteld door dr. ir. K. Teer van dit laboratorium.

Digitized in Heiloo the Netherlands
Not for sale!

www.freeservicemanuals.info

11/14/2023

Samenvatting. Aangezien een analoog signaal met een bandbreedte B geheel wordt bepaald door $2B$ bemonsteringen per seconde, kan het worden opgeslagen in een schuifregister waarvan elke cel een analoge waarde kan bevatten. Het emmertjesgeheugen vormt een dergelijk register; de cellen bestaan uit een geheugencondensator waarvan de spanning de bemonsterde signaalwaarde weergeeft, en een transistor die het doorschuiven van de informatie verzorgt. Dit gebeurt niet door lading van de condensator te verplaatsen in de voortplantingsrichting van het signaal, maar door lading van de eerstvolgende condensator in tegengestelde richting te verplaatsen tot de spanning op de eerstgenoemde condensator een vast referentieniveau heeft bereikt. De signaalwaarde is dan naar de volgende cel geschoven. Bij de eenvoudigste schakeling zijn twee schuifspanningen nodig, terwijl steeds elke tweede cel een signaalwaarde bevat. Gebruiken we dit register als vertragingslijn, dan is voor een vertraging van τ seconden van een signaal met bandbreedte B een aantal van $4B\tau$ cellen nodig. Een belangrijk voordeel van het emmertjesgeheugen is dat een zelfde schakeling bruikbaar is bij grote B en kleine τ (dus b.v. in het video-gebied), en bij kleine B en grote τ (audio). Verder kan de vertragingstijd continu worden gevarieerd door de schuiffrequentie te variëren. De informatiedichtheid in de schakeling kan worden opgevoerd door meer schuifspanningen te gebruiken. De schakeling leent zich uitstekend voor integratie. Per cel is dan alleen een transistor nodig; de capaciteit tussen basis en collector, die door een speciale vorm van de diffusiegebieden is vergroot, dient als geheugencondensator. Op een kristalplaatje kan een groot aantal cellen worden geplaatst; in het artikel wordt een experimentele monolithische schakeling beschreven met 72 cellen, een versterktrap (nodig om verliezen te compenseren die ontstaan door de basisstroom van de transistors), een bemonsteringsschakeling en een uitgangsschakeling. De schakeling is bruikbaar bij bandbreedten van ongeveer 10 kHz tot 15 MHz. Het emmertjesgeheugen kan ook worden uitgevoerd met MOS-transistors. Doordat er bij MOS-transistors geen stuurstroom loopt, zijn de verschillende schakelingen hierbij eenvoudiger dan bij het bipolaire geheugen; de maximale frequentie is echter lager en de dissipatie hoger. Naast de algemene toepassing als audio- en video-vertragingslijn behandelt het artikel nog enkele speciale toepassingen, nl. het corrigeren van tijdfouten bij weergave via magneetband, het construeren van transversale filters en van lichtgevoelige opneempanelen.

Digitized in Heiloo the Netherlands
Not for sale!

www.freeservicemanuals.info

11/14/2023

Voorwerpen van glasachtige kool

Men is erin geslaagd langs synthetische weg een nieuwe vaste modificatie van koolstof te bereiden, die in sommige opzichten sterk verschilt van de bekende modificaties, diamant en grafiet. Deze zg. glasachtige kool ontstaat bij thermische ontleding (pyrolyse) van geschikte polymeren, b.v. fenolformaldehydeharsen. Ten aanzien van zijn fysische eigenschappen is glasachtige kool volledig isotroop. Het nieuwe materiaal paart de gunstige eigenschappen van grafiet (groot thermisch en elektrisch geleidingsvermogen en bestandheid tegen hoge temperaturen en temperatuurwisselingen) aan een grote sterkte. Verder is de hardheid (Mohs 6-7) veel groter dan die van grafiet, en niettegenstaande de geringe dichtheid (1,4-1,5 g/cm^3) laat het in het geheel geen gas door. Het materiaal is buitengewoon corrosievast, en uit tal van experimenten is gebleken dat glasachtige kool zeer geschikt is om er kroezen voor chemisch en metallurgisch werk van te maken. Op de foto ziet men een aantal kroezen, schaaltjes en plaatjes van verschillende vormen en afmetingen, die in het Philipslaboratorium te Aken zijn vervaardigd.

Het rechtsonder afgebeelde plaatje bestaat uit *schuimkool* die met glasachtige kool is versterkt. Dit materiaal onderscheidt zich van in de handel verkrijgbare schuimkoolstoffen door een aanmerkelijk grotere sterkte en grotere bestandheid tegen oxidatie (het verbrandt in lucht pas bij 600 °C). Men verkrijgt deze versterkte schuimkool door verkoling van een polymere schuimstof die doortrokken is met een geschikt impregneermiddel, zoals de reeds eerder genoemde fenolformaldehydeharsen. De dichtheid ervan kan men variëren van 0,1 g/cm^3 tot b.v. 1,0 g/cm^3, waarbij de drukvastheid toeneemt van 10 tot 25 000 N/cm^2 doch de warmtegeleiding slechts van 8×10^{-4} tot 14×10^{-4} J/°C s cm, wat voor warmte-isolatie — een belangrijke toepassing van dit materiaal — een groot voordeel is. De versterkte schuimkool, die ook als constructiemateriaal bruikbaar is, kan zowel vóór als na het verkolingsproces mechanisch bewerkt worden, zij het dat daar in het laatste geval diamantgereedschap voor nodig is.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info
11/14/2023

Een opstelling voor het bepalen van ruis in röntgenfilms

C. Albrecht en J. Proper

Evenals in de elektronica is de signaal-ruisverhouding in de fotografie een belangrijke grootheid; te zamen met het contrast en de scherpte van de afbeelding bepaalt deze de waarneembaarheid van details. Aan de ruis wordt bij röntgenopnamen zowel bijgedragen door korreligheid van de film als door statistische fluctuaties in de intensiteit van de röntgenbundel. Er is voor het meten van de transmissieruis van röntgenfilms een meetopstelling ontwikkeld, waarin wegens de relatief grote dikte van deze film met een slanke lichtbundel wordt gewerkt. Het is met deze opstelling mogelijk snel achtereen een aantal filmmonsters te onderzoeken.

Inleiding

Voor het stellen van een juiste diagnose moet een radioloog soms in staat zijn in een röntgenopname nog fijne details waar te nemen (vanaf ongeveer 40 μm). Behalve door gebrek aan contrast of door onscherpte kan de waarneembaarheid beperkt worden door ruis, enerzijds veroorzaakt door de korrelige structuur van de filmemulsie (filmruis), anderzijds door de statistische fluctuaties in de intensiteit van de voor het maken van een opname gebruikte röntgenbundel (hagelruis van de stroom röntgenquanta, kortweg: quantumruis).

In de fotografie met zichtbaar licht (of met infrarood) bestaan voor het bestuderen van fijne details reeds geruime tijd zg. microdensitometers. Voor het meten van de ruis wordt een filmmonster met behulp van een lichtbundel afgetast en de fluctuaties in de hoeveelheid doorgelaten licht worden gedetecteerd, b.v. met behulp van een fotomultiplicatorbuis of fotocel [1]. *Fig. 1* geeft schematisch de werking van een dergelijk apparaat weer. Het objectief O_1 beeldt het diafragma D_1, dat door de lamp S en de condensor C_1 verlicht wordt,

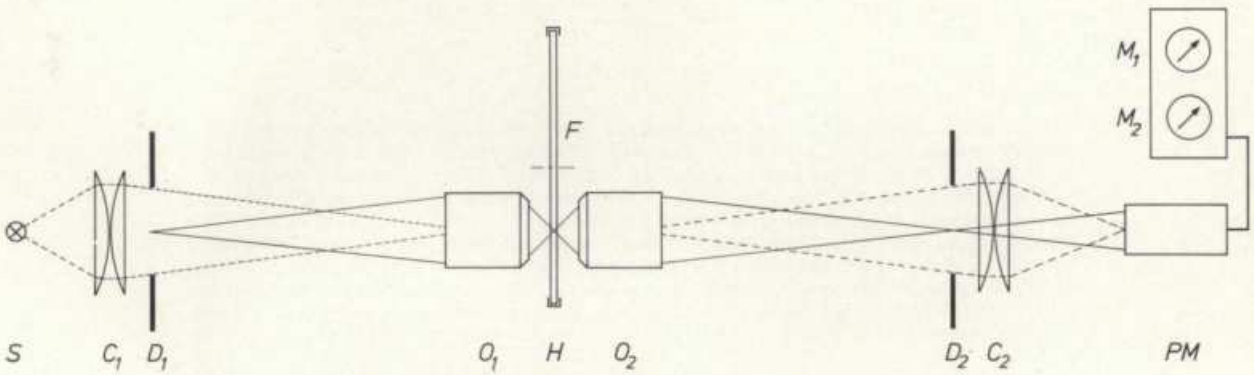

Fig. 1. Schematische voorstelling van een conventionele microdensitometer. S lamp. C_1 condensor. D_1 diafragma dat de lichtbundel begrenst om strooilicht te vermijden. O_1 en O_2 microscoopobjectieven. F film. H excentrisch roterende filmhouder. D_2 meetdiafragma. C_2 condensor. PM fotomultiplicatorbuis. M_1 lineair instrument voor het meten van de gemiddelde transmissie T. M_2 kwadratisch instrument voor het meten van de effectieve waarde van de fluctuaties in de transmissie (ruis). Het objectief O_1 beeldt D_1 af op de film. Het objectief O_2 beeldt het zo verkregen lichtvlekje af op D_2. Het doorgelaten licht wordt door de condensor C_2 op de fotomultiplicatorbuis geworpen, die een uitgangssignaal levert dat gemeten wordt met M_1 en M_2.

Dr. C. Albrecht, medewerker van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven; J. Proper, medewerker van Philips' Hoofdindustriegroep Medical Systems, Eindhoven.

[1] Zie b.v. G. C. Higgins en L. A. Jones, Photogr. Engng. **6**, 20, 1955.

Digitized in Heiloo the Netherlands
Not for sale!

www.freeservicemanuals.info

11/14/2023

af op de film F. De zo verkregen lichtvlek wordt door het objectief O_2 afgebeeld op het meetdiafragma D_2, waarvan de opening door verwisseling kan worden veranderd. Om strooilicht te vermijden zorgt men ervoor dat D_1 steeds iets groter is dan D_2. Het door D_2 doorgelaten licht wordt door de condensor C_2 op de katode van de fotomultiplicatorbuis PM geconcentreerd.

Wanneer men nu de filmhouder H excentrisch ten opzichte van de optische as laat roteren, zal het lichtvlekje een cirkelvormige baan op de film beschrijven en zal de fotomultiplicatorbuis een signaal afgeven dat op elk moment evenredig is met de plaatselijke transmissie T van de film, gemiddeld over de oppervlakte van het lichtvlekje. De in de tijd gemiddelde waarde van de transmissie over de door het lichtvlekje beschreven filmoppervlakte wordt gemeten met behulp van een lineair instrument M_1, terwijl de effectieve waarde van de transmissiefluctuaties gemeten wordt met behulp van een meetinstrument met een kwadratische karakteristiek M_2. Deze effectieve waarde is gelijk aan de standaarddeviatie $\sigma(T)$ van de transmissie T [2] en is een maat voor de ruisintensiteit. Het quotiënt $\bar{T}/\sigma(T)$ geeft dan de signaal-ruisverhouding van de transmissie en kan bij een gegeven contrast dienen als uitgangspunt voor het bepalen van de waarneembaarheid van details.

Omdat de emulsielaag van gewone fotografische films een dikte heeft van de orde van grootte van 10 μm, kan men bij het onderzoek aan deze films grote openingshoeken toelaten voor de lichtbundel waarmee de film wordt afgetast. Zodoende kan men sterke verkleiningen bereiken (een verkleiningsfactor van 200 is geen uitzondering). Er kan daarom bij het gebruik van een meetdiafragma van redelijke afmetingen toch gewerkt worden met een aftastbundel die ter plaatse van de film een doorsnede heeft van slechts enkele μm, wat voor films met een zeer fijne structuur, b.v. die voor cartografie en microfotografie, van belang is.

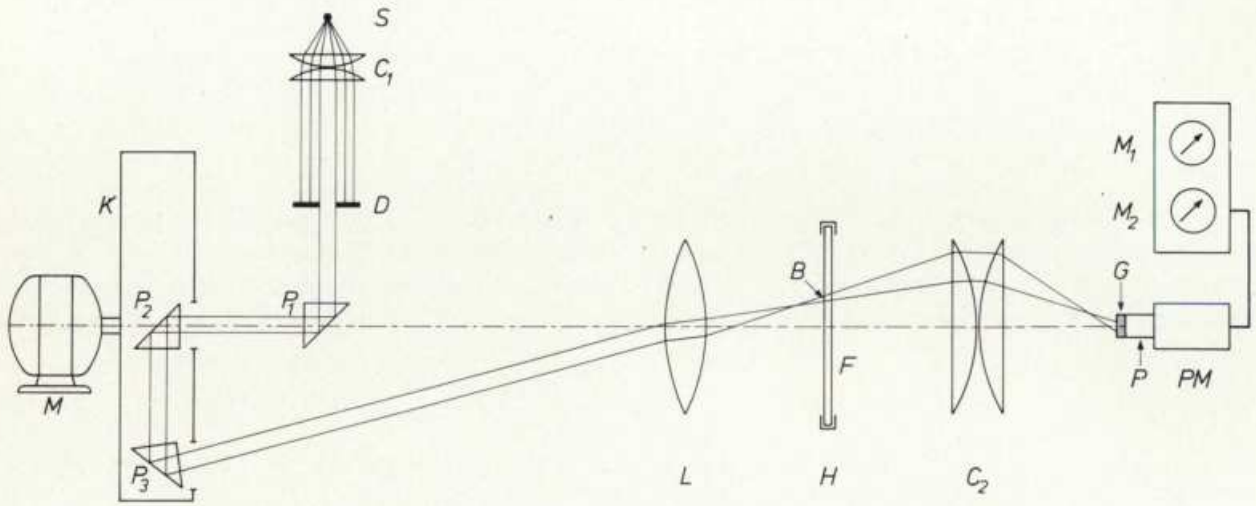

Fig. 2. Nieuwe opstelling voor het meten van ruis in röntgenfilms. S kwiklamp met een lichtgevend oppervlak van slechts 300 μm doorsnede (Philips type CS, 100 W). C_1 condensor. D diafragma. P_1 instelbaar prisma, dat de as van de evenwijdige lichtbundel doet samenvallen met de optische as van L en C_2. P_2 en P_3 roterende prisma's, gemonteerd in de op de as van de motor M aangebrachte koker K. L objectief („Xenotar" f : 2,8; 150 mm). F film. H stilstaande, verstelbare filmhouder. B afbeelding van het diafragma D. Door verwisseling van D kan B in stappen gevarieerd worden van 40 μm tot 1 mm. C_2 condensor. G schijfje opaalglas, gekit op een staafje transparante kunststof P dat aan de buitenkant bedekt is met Al_2O_3. PM fotomultiplicatorbuis. M_1 lineair en M_2 kwadratisch meetinstrument. Enkele dimensiegegevens: S-C 50 mm. C_1-D_1 350 mm. Optische weglengte D-L 800 mm. L-F ca. 150 mm.

Voor röntgenopnamen gebruikt men voor het verkrijgen van een zo groot mogelijke absorptie van röntgenquanta films die aan beide zijden van de drager van een emulsielaag voorzien zijn, waardoor de totale dikte van zo'n film wel 200 à 300 μm kan bedragen. Het is hier dan ook noodzakelijk met veel kleinere openingshoeken van de aftastende lichtbundel te werken. De hiermee gepaard gaande geringere verkleining is geen bezwaar, aangezien de kleinste interessante details bij een röntgenfilm in het algemeen groter zijn dan die bij reeds eerder genoemde films.

Een ander verschil tussen de door ons ontwikkelde meetmethode en de beschreven microdensitometer is het feit dat de lichtbundel roteert en de filmhouder

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gefixeerd is. Hierdoor kan men de filmmonsters snel verwisselen en ook gemakkelijk van een monster snel achtereen een aantal verschillende zones onderzoeken.

De meetapparatuur voor röntgenfilms

De door ons ontworpen opstelling is schematisch weergegeven in *fig. 2*. De lichtbron (S) is een Philips kwiklamp type CS van 100 W. Deze lamp werd speciaal ontworpen voor meet- en projectiedoeleinden en heeft een lichtgevend oppervlak met een diameter van slechts 0,3 mm. Van het licht van de kwiklamp wordt door de condensor C_1 een nagenoeg evenwijdige bundel gevormd die op het verwisselbare, ronde diafragma D valt. De opening van dit diafragma kan in stappen gevarieerd worden van 0,2 mm tot 6 mm. De doorgelaten lichtbundel wordt door het verstelbare prisma P_1 zodanig gereflecteerd dat de as ervan samenvalt met de optische as van het lenzenstelsel L-C_2. Vervolgens wordt door de prisma's P_2 en P_3 de bundel geworpen op een lens L, een „Xenotar" objectief f : 2,8 met een brandpuntsafstand van 150 mm, die het diafragma 6× verkleind afbeeldt op de film F. P_2 en P_3 zijn in een koker K gemonteerd, die met de as van de motor M verbonden is. Wanneer deze as draait, zal het lichtvlekje weer een cirkelvormige baan op de film F beschrijven. De snelheid waarmee de lichtbundel roteert bedraagt 25 omwentelingen per seconde, de diameter van de cirkelvormige baan 35 mm. Door verwisseling van D kan de diameter van de lichtvlek op de film gevarieerd worden van 40 μm tot 1 mm. De proefstrookjes van de te onderzoeken film kunnen eenvoudig in de stilstaande filmhouder H geschoven worden, zonder dat de motor behoeft te worden stilgezet, zoals bij de microdensitometer van fig. 1 het geval is. Bovendien kan de filmhouder in drie richtingen versteld worden, zodat men goed kan focusseren en door H horizontaal en/of verticaal te bewegen, de film op verschillende plaatsen kan onderzoeken.

Het door de film doorgelaten licht wordt door de condensorlens C_2 op een schijfje opaalglas geworpen. Dit schijfje is met het venster van de fotomultiplicatorbuis PM verbonden door middel van een staafje transparante kunststof dat aan de buitenkant met Al_2O_3 bedekt is, zodat het licht gelijkmatig over de fotokatode van de multiplicatorbuis verdeeld wordt. Hiermee wordt bereikt dat veranderingen in de diameter en trefplaats van de bundel geen invloed hebben op het uitgangssignaal, dat anders beïnvloed zou kunnen worden door plaatselijke verschillen in de gevoeligheid van de fotokatode. Op dezelfde wijze als bij de microdensitometer van fig. 1 worden ook hier weer $\bar{T}$ en $\sigma(T)$ gemeten met behulp van de meters M_1 en M_2. Het is gebleken dat een verschuiving van de filmhouder in de asrichting van 1 mm naar beide zijden nauwelijks invloed heeft op de meetresultaten. Hieruit blijkt dat de scherptediepte groot genoeg is om de relatief dikke röntgenfilms nauwkeurig te meten.

Het vergelijken van de gemeten transmissieruis met de quantumruis

De ruis die met de beschreven opstelling gemeten wordt, is een combinatie van filmruis en quantumruis. Het aandeel van de quantumruis kan afzonderlijk gevonden worden, en wel als volgt. Men meet de exposie [3] die nodig is om een bepaalde zwarting van de film te verkrijgen. Uit deze grootheid en de quantumenergie volgt het aantal quanta dat de film per m² getroffen heeft; dit aantal wordt fluentie genoemd en aangeduid met Φ. Uit de fluentie en de absorptiecoëfficiënt van de film α, die bepaald wordt uit de massa-absorptiecoëfficiënt van het in de filmemulsie gebruikte zilverbromide en de hoeveelheid ervan per m², volgt het aantal per m² geabsorbeerde quanta $\alpha\,\Phi$. Aangezien voor de quantumruis een Poisson-verdeling geldt, bedraagt de standaarddeviatie of ruis, betrokken op een oppervlakte met diameter d:

$$\sigma(\alpha\Phi) = \tfrac{1}{2}d\sqrt{\pi\alpha\Phi}, \qquad (1)$$

en de signaal-ruisverhouding:

$$\frac{\tfrac{1}{4}\pi d^2\alpha\Phi}{\tfrac{1}{2}d\sqrt{\pi\alpha\Phi}} = \tfrac{1}{2}d\sqrt{\pi\alpha\Phi}. \qquad (2)$$

Deze grootheden zijn in dit geval aan elkaar gelijk.

Om de gemeten signaal-ruisverhouding van de transmissie te kunnen vergelijken met die welke veroorzaakt wordt door de quantumruis, is het wenselijk de transmissiefluctuaties uit te drukken in equivalente fluentiefluctuaties.

Hiervoor moeten wij een kleine omweg maken via de zg. „zwartingskromme". Deze geeft het verband tussen de zwarting D en de logaritme van de fluentie Φ (zie *fig. 3*). De zwarting is gedefinieerd als de negatieve logaritme van de transmissie T:

$$D = -\log T. \qquad (3)$$

De gradatie of steilheid van de film wordt gegeven door $\mathrm{d}D/\mathrm{d}\log\Phi = \mathrm{tg}\,\beta$ en wordt aangeduid met γ [4].

---

[2] Voor de continu veranderende transmissie is de standaarddeviatie $\sigma(T)$ gelijk aan $\{\int_0^{2\pi r}(T-\bar{T})^2\,\mathrm{d}x/2\pi r\}^{1/2}$, waarin $2r$ de diameter van het aftastspoor is. Deze uitdrukking is tevens gelijk aan de effectieve waarde van T, gemeten over de cirkelbaan.

[3] Deze grootheid werd vroeger bestralingsdosis genoemd, zie b.v. J. Hesselink en K. Reinsma, Philips techn. T. **23**, 47, 1961.

[4] Voor een meer uitgebreide behandeling van de eigenschappen van röntgenfilms raadplege men b.v. D. H. O. John, Radiographic processing in medicine and industry, The Focal Press, Londen 1967.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info
11/14/2023

Uit (3) kan men afleiden dat:

$$\gamma = \frac{dD}{d \log \Phi} = -\frac{dT}{d\Phi} \cdot \frac{\Phi}{T}. \quad . . . . . \quad (4)$$

Op iedere plaats op de film correspondeert dus met een relatieve toeneming $\Delta T/\bar{T}$ van de transmissie ten opzichte van de achtergrond een relatieve afneming $\Delta\Phi/\bar{\Phi}$ van de fluentie, die gegeven wordt door:

$$\frac{\Delta\Phi}{\bar{\Phi}} = -\frac{1}{\gamma}\frac{\Delta T}{\bar{T}}. \quad . . . . . \quad (5)$$

Hierin stellen $\bar{T}$ en $\bar{\Phi}$ de gemiddelde waarden van de transmissie en de fluentie voor die betrekking hebben op de achtergrond. Dan geldt ook:

$$\left(\frac{\sigma_{eq}(\Phi)}{\bar{\Phi}}\right)_d = \frac{1}{\gamma}\left(\frac{\sigma(T)}{\bar{T}}\right)_d, \quad . . . . \quad (6)$$

waarin de index d aangeeft dat de metingen zijn verricht aan een oppervlakje met een diameter d. De grootheid $\sigma_{eq}(\Phi)$ is de „equivalente" standaarddeviatie van de fluentie, die de gemeten standaarddeviatie van de transmissie zou veroorzaken indien alle ruis door de röntgenbundel veroorzaakt zou worden. Het is nu dus mogelijk quantumruis en filmruis kwantitatief te vergelijken.

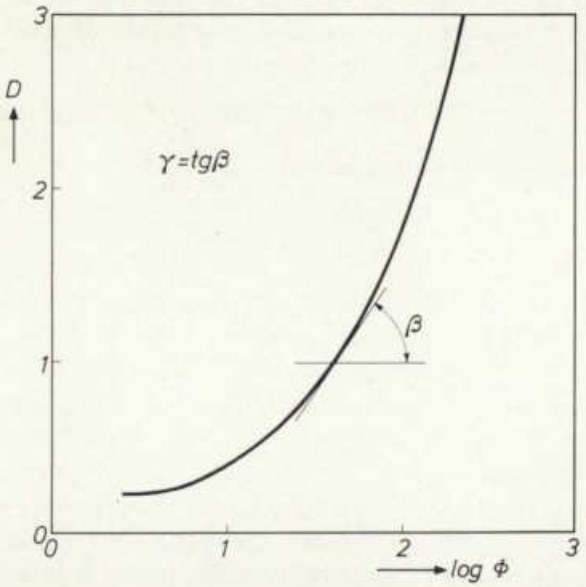

Fig. 3. Voorbeeld van het verloop van een zwartingskromme van een röntgenfilm. Deze geeft de zwarting D als functie van de logaritme van de fluentie Φ. De gradatie γ van de film is de tangens van de hellingshoek β. In tegenstelling met de zwartingskromme die verkregen wordt bij bestraling met zichtbaar licht, vertoont de hier gegeven kromme geen recht gedeelte. De gradatie neemt toe met toenemende zwarting.

Om een bepaald detail met het relatieve contrast $\Delta T/\bar{T}$ ten opzichte van de achtergrond met transmissie $\bar{T}$ te kunnen waarnemen moet $\Delta T/\bar{T}$ minstens het drievoud zijn van $\sigma T/\bar{T}$ [5]. Dit geeft, te zamen met (6):

$$\{\bar{\Phi}/(\sigma)_{eq}(\Phi)\}_d \geqq 3\gamma\bar{T}/\Delta T. \quad . . . . \quad (7)$$

Hiermee is een uitdrukking gevonden voor de minimale waarde van de equivalente signaal-ruisverhouding van de fluentie waarbij een detail met een bepaald transmissiecontrast nog waarneembaar is.

Om met behulp van (7) de signaal-ruisverhouding te kunnen berekenen, moet nog de waarde van γ bij de aanwezige zwarting bepaald worden. Het meten van tg β uit de met een geringe toeneming van log Φ gepaard gaande toeneming van de zwarting is te onnauwkeurig. Om deze reden, en tevens om fouten ten gevolge van het zg. Callier-effect te vermijden, hebben wij een meetmethode ontwikkeld, waarbij de ruismeter zelf voor het bepalen van γ gebruikt wordt. Deze methode berust o.a. op het principe dat men de precisie van een meting vergroot door de waarneming vele malen te herhalen.

Voor het bepalen van γ beginnen wij met het maken van een testpatroon. Op een strookje film wordt een spaakwiel van lood gelegd dat enige tientallen spaken heeft en waarvan de binnendiameter iets groter is dan de diameter van het aftastspoor van de ruismeter. Door belichten met röntgenstralen en ontwikkelen wordt een beeld van het spaakwiel met een groot contrast verkregen. Door aftasten met de ruismeter, waarbij de lichtvlek beurtelings belichte stukken van de film passeert en ter plaatse van de spaken onbelichte, wordt de effectieve waarde van de variatie van de transmissie gemeten. Een statische meting op en tussen de „spaken" geeft de top-topwaarde. Hieruit volgt de ijkconstante van de ruismeter. Met deze constante kan men dus een effectieve waarde vertalen in een contrast.

Voor het meten van de ruis en het bepalen van γ wordt nu op een proefstrook van de te onderzoeken film het spaakwiel gelegd en er wordt korte tijd belicht. Hierna wordt het spaakwiel verwijderd en de proefstrook zolang nabelicht dat buiten de spaken van het wiel na ontwikkelen de gewenste zwarting verkregen is. De tijd van voorbelichting wordt zo gekozen dat er tussen de spaken en de rest van de film slechts een gering contrast ontstaat (verschil in de transmissie 5 à 10%). Door nu de afbeelding van het wiel op dezelfde wijze als hierboven met de ruismeter af te tasten, wordt een effectieve waarde van de transmissievariatie verkregen, die met behulp van de reeds bepaalde ijkconstante nauwkeurig het contrastverschil geeft dat door een bepaalde kleine verandering in de belichting veroorzaakt wordt. Hieruit is γ te berekenen. De ruismeting geschiedt elders op de proefstrook.

Enige met de nieuwe meetopstelling verkregen resultaten

In *fig. 4* zijn de resultaten weergegeven van metingen aan twee soorten röntgenfilms, nl. een film voor industriële toepassing (Gevaert type D4) en een die geschikt is voor medische toepassing (Gevaert type D10). De equivalente signaal-ruisverhouding van de fluentie $\{\bar{\Phi}/\sigma_{eq}(\Phi)\}_d$ is uitgezet als functie van de diameter van de aftastvlek, beide op een logaritmische schaal bij een zwarting $D = 1{,}75$ (getrokken krommen). De metingen werden verricht met röntgenstralen met een

Digitized in Heiloo the Netherlands
Not for sale!

www.freeservicemanuals.info
11/14/2023

effectieve quantumenergie van resp. 32 keV en 105 keV. De straling was zo sterk gefilterd dat ze voor ons doel als monochromatisch mocht worden beschouwd. De gestreepte krommen geven de waarde van de signaal-ruisverhouding in het aantal geabsorbeerde röntgenquanta, berekend uit (2). Deze grootheid is gelijk aan de waarde van $\{\overline{\Phi}/\sigma_{eq}(\Phi)\}_d$ die men zou vinden als verhouding gemeten worden dan bepaald wordt door de quantumruis. Uit het bovenstaande volgt dat het scheidend vermogen van de door ons ontwikkelde ruismeter groter is dan nodig voor het bepalen van ruis in de zeer fijnkorrelige D4-film. Het instrument is dus zeker geschikt voor ruismeting aan de in het algemeen snellere en grovere films voor medische toepassing.

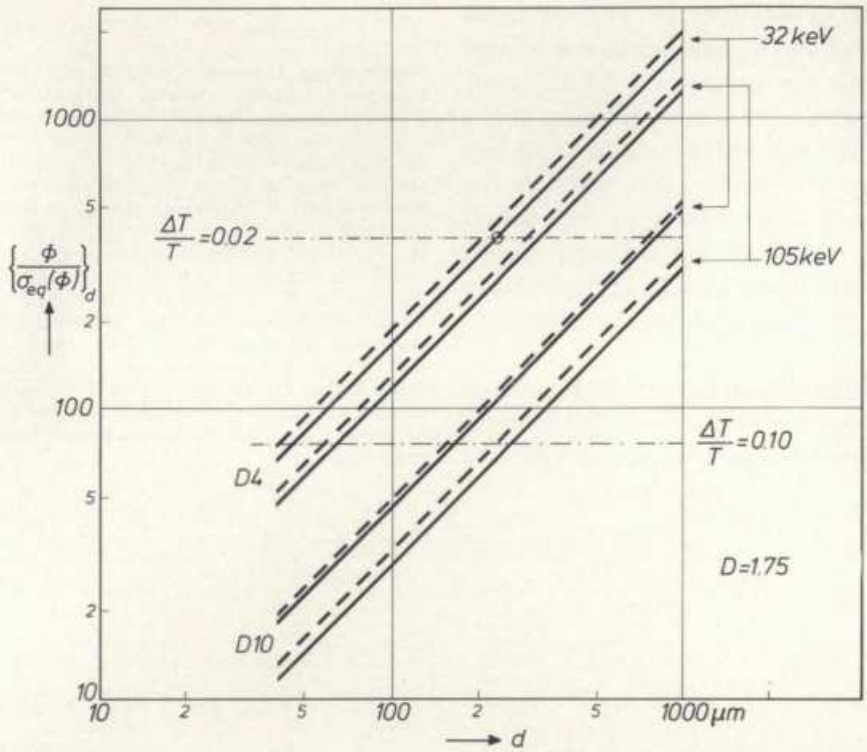

Fig. 4. De signaal-ruisverhouding als functie van de diameter d van de aftastvlek voor de Gevaertfilms D4 en D10 bij twee waarden van de quantumenergie. De filmzwarting D bedroeg in alle gevallen 1,75. Getrokken krommen: uit transmissiemetingen verkregen signaal-ruisverhouding $\{\overline{\Phi}/\sigma_{eq}(\Phi)\}_d$ van de fluentie. Gestreepte krommen: signaal-ruisverhouding berekend uit d, de fluentie Φ en de absorptiecoëfficiënt α. Afgezien van kleine verschillen die veroorzaakt kunnen zijn door onnauwkeurigheid in de gegevens voor de berekening van de quantumruis, is voor alle gevallen de gemeten signaal-ruisverhouding gelijk aan de berekende. Dit betekent, dat het scheidend vermogen hier bepaald wordt door de quantumruis.

De horizontale streep-stiplijnen geven de waarde van de signaal-ruisverhouding die vereist is om nog details met een relatief contrast in de transmissie van resp. 2% en 10% te kunnen waarnemen. Zo geeft b.v. de cirkel aan dat met een D4-film bij röntgenstraling van 32 keV en een contrast van 2% nog details waarneembaar zijn met een diameter van 250 µm.

de transmissiefluctuaties uitsluitend zouden worden veroorzaakt door de ruimtelijke statistische fluctuaties in de verdeling van de opvallende straling en door de absorptieprocessen in de film.

Zoals men in fig. 4 ziet, is voor beide films de equivalente signaal-ruisverhouding van de transmissie nagenoeg gelijk aan die van de quantumruis. Bovendien ligt het verschil binnen de onnauwkeurigheid die aan de berekening van de quantumruis zal kleven, zodat men de conclusie mag trekken dat voor de genoemde films de quantumruis de beperkende factor is. Er kan immers aan de film geen grotere waarde van de signaal-ruis-

Men zou denken dat zolang de filmruis kleiner is dan de quantumruis, men de film een grovere structuur zou kunnen geven om zodoende de snelheid groter te maken. Dan wordt het voor een bepaalde zwarting vereiste aantal quanta echter kleiner, zodat de signaal-ruisverhouding afneemt. Dit is duidelijk te zien aan de D10-film van Gevaert, die 30 maal zo snel is als de D4-film en waarvan de emulsielagen 2 maal zo dik zijn, zodat voor dezelfde zwarting 15 maal zo weinig quanta nodig zijn. De signaal-ruisverhouding zou dus een factor $\sqrt{15}$ kleiner moeten zijn, hetgeen inderdaad uit de metingen volgt.

[5] T. Tol, W. J. Oosterkamp en J. Proper, Limits of detail perceptibility in radiology particularly when using the image intensifier, Philips Res. Repts. **10**, 141-157, 1955.

Digitized in Heiloo the Netherlands
Not for sale!

www.freeservicemanuals.info
11/14/2023

Verder blijkt uit fig. 4 dat de signaal-ruisverhouding evenredig is met de diameter van het aftastvlekje, zoals ook uit (2) volgt.

Voor straling met een quantumenergie van 105 keV is de signaal-ruisverhouding kleiner dan voor straling van 32 keV, doordat er voor het verkrijgen van een bepaalde zwarting minder quanta van 105 keV nodig zijn.

Uit fig. 4 kan ten slotte nog het volgende geconcludeerd worden. Het kleinste contrast $\Delta T/T$ in transmissie dat het oog nog kan waarnemen, bedraagt ongeveer 2%. Uit (7) volgt dan, dat met $\gamma = 2{,}5$ de waarde van $\{\Phi/\sigma_{eq}(\Phi)\}_d$ ten minste 375 moet bedragen om bij een energie van 32 keV met de D4-film nog details met een diameter van ca. 250 μm en met de D10-film van ca. 800 μm te kunnen waarnemen. Voor een contrast van 10% geeft de D4-film bij deze quantumenergie een minimale detailgrootte van ca. 50 μm, de D10-film een van ca. 150 μm (onderste horizontale streep-stiplijn).

Met behulp van de door ons ontwikkelde meetopstelling zijn ook reeds metingen verricht aan röntgenfilms, waarbij tijdens de belichting aan beide zijden een fluorescerende laag tegen de emulsielaag gedrukt wordt, hetgeen de gevoeligheid verhoogt [6] zodat de röntgendosis kleiner kan zijn. De beschreven methode is ook geschikt voor het bepalen van ruis in röntgenopnamen die via een röntgenbeeldversterker verkregen zijn.

[6] C. Albrecht en J. Proper, Medicamundi **11**, 44, 1965, speciaal fig. 1.

Samenvatting. Tot de ruis in een röntgenopname wordt, behalve door de quantumruis van de röntgenbundel, ook bijgedragen door de korrelige structuur van de filmemulsie. Deze filmruis kan een beperking voor de kwaliteit van de opname en daardoor van de diagnostische bruikbaarheid vormen. Er is een eenvoudige methode ontwikkeld om de signaal-ruisverhouding van röntgenfilms te meten. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een roterende lichtbundel met kleine openingshoek die een stilstaand filmmonster langs een cirkelbaan aftast. Door deze kleine openingshoek is de scherptediepte voldoende groot om de relatief dikke röntgenfilms (≈ 0,3 mm) te kunnen meten. Door met een stilstaande filmhouder te werken kunnen filmmonsters snel en gemakkelijk achter elkaar gemeten worden. Uit meetresultaten blijkt onder meer, dat de signaal-ruisverhouding bij gebruik van Gevaert films van het type D4 en D10 beperkt wordt door quantumruis. De methode kan ook gebruikt worden om röntgenopnamen te onderzoeken die via een röntgenbeeldversterker verkregen zijn.

Digitized in Heiloo the Netherlands
Not for sale!

www.freeservicemanuals.info
11/14/2023

Meting van diametervariaties van draad

Voor het ontwerpen, instellen of besturen van wikkelmachines voor fijne spoelen of spiralen van allerlei vorm en op verschillende manieren gewikkeld, zijn gegevens over het wikkelproces nodig. Een belangrijke grootheid, die vooral bij spoelen met ingewikkelde vorm tijdens het wikkelen sterk kan fluctueren, is de mechanische spanning op de draad (b.v. koperdraad met een dikte van tien tot enkele honderden microns). Wordt deze spanning te groot, dan treden er ontoelaatbare variaties op in de diameter van de draad. Deze diametervariaties kunnen op de hierna te beschrijven wijze continu en zeer gevoelig gedetecteerd worden. Hiertoe wordt de draad door een spoeltje gevoerd dat te zamen met aanwezige parasitaire capaciteiten een hoogfrequente trillingskring vormt. Het blijkt dat bij variaties van de diameter van de draad de resonantiefrequentie en de demping van de trillingskring eveneens variëren.

De in *fig. 1* afgebeelde meetkop bevat een dunwandig kwartsbuisje met een inwendige diameter van 1 à 3 mm — afhankelijk van de dikte van de te meten draad —, waaromheen een spoeltje van enkele windingen dun koperdraad is gewikkeld. Verder bevat de meetkop een schakeling voor gelijkrichting en detectie van de spanning over de trillingskring, waarvan de amplitude varieert als functie van de draaddikte.

De trillingskring wordt gevoed door een oscillator, die door middel van een coaxiale kabel verbonden is met de meetkop. De frequentie van deze oscillator wordt ingesteld op een punt van de opgaande flank van de resonantiekromme van de trillingskring. Op deze wijze veroorzaakt een kleine verstemming van de trillingskring een relatief grote verandering van de amplitude van de spanning over de kring.

De grootste gevoeligheid wordt bereikt indien de dimensionering van het spoeltje zodanig aan de diameter van het kwartsbuisje wordt aangepast dat de resonantiefrequentie omstreeks 300 MHz bedraagt. Bij een hoogfrequente spanning van 2 V is een variatie van $\frac{1}{2}\%$ van de dikte van koperdraad dan gemakkelijk te detecteren.

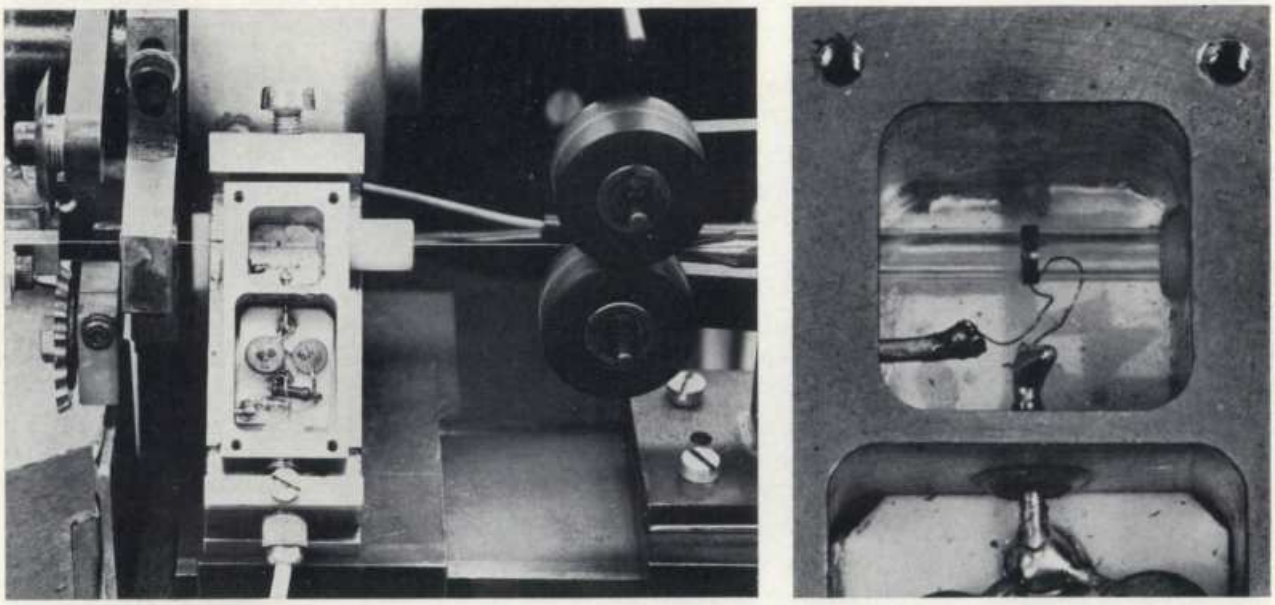

Fig. 1. De meetkop. Het bovenste gedeelte bevat het op een kwartsbuisje gewikkelde spoeltje waardoorheen de te meten draad wordt getrokken. In het onderste gedeelte bevindt zich de gelijkricht- en detectieschakeling. De voorwand van het doosje, waarin zich een glazen venstertje bevindt om de draad en het spoeltje te kunnen waarnemen, is weggenomen. Het oscillatorgedeelte van de meetinrichting is niet afgebeeld.

Het gedetecteerde gelijkspanningssignaal wordt in het oscillatorgedeelte afgenomen van de coaxiale kabel en versterkt, waarna het aan een meet- of registratieapparaat wordt toegevoerd. Het signaal kan gebruikt worden voor bewaking van het wikkelproces (stopzetten van de machine) of voor besturing ervan (regelen van de wikkelspanning).

P. G. Havas

Ir. P. G. Havas, medewerker van Philips' Hoofdindustriegroep Licht, Eindhoven.

Digitized in Heiloo the Netherlands
Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Een toestel voor het meten en regelen van lage zuurstofdrukken

N. M. Beekmans en L. Heyne

Het gebruik van zirkooncalciumoxide als vaste elektrolyt in toestellen voor het meten van lage partiële zuurstofdrukken is reeds geruime tijd gemeengoed. Door het aantal contacten uit te breiden en door ervoor te zorgen dat deze zich als goed reversibele elektrodes gedragen, hebben de auteurs nu een toestel ontwikkeld dat niet alleen een zeer groot meetgebied voor zuurstof bestrijkt — ca. 10^{-30} tot 1 bar —, maar waarmee men bovendien gelijktijdig de zuurstofdruk in een gassysteem kan regelen. Dank zij de lage ondergrens van het meetgebied kan men het apparaat ook gebruiken voor het meten van de partiële druk van met zuurstof reagerende componenten in een gasmengsel.

Sommige vaste oxiden hebben de eigenschap dat hun zuurstofionen bij hoge temperatuur beweeglijk worden, zodat de stof dan als een vaste elektrolyt kan fungeren. Bevinden zich aan weerszijden van een wand die uit een dergelijk oxide bestaat, gassen met verschillende partiële zuurstofdruk, dan zal er door diffusie van de negatief geladen zuurstofionen een elektrisch potentiaalverschil ontstaan, juist zoals bij galvanische elementen met vloeibare elektrolyten. Men heeft voorgesteld dit verschijnsel te gebruiken voor brandstofcellen [1], en men heeft het toegepast voor het meten van partiële zuurstofdrukken [2]; daarbij werd b.v. zirkooncalciumoxide als elektrolyt gebruikt. In het Philipslaboratorium te Eindhoven hebben wij een soortgelijk toestel ontwikkeld, waarmee niet alleen de partiële zuurstofdruk tot zeer lage waarden (ca. 10^{-30} bar, bij een werktemperatuur van ca. 600 °C) kan worden gemeten maar waarmee bovendien, dank zij een extra-elektrode, *gelijktijdig dosering* van zuurstof in een gas- of vacuümsysteem kan plaatsvinden. Door de lage ondergrens van het meetgebied is het toestel ook zeer geschikt voor het bepalen van de partiële druk van met zuurstof reagerende componenten in een gasmengsel.

De constructie van ons instrument wijkt in menig opzicht af van die van elders beschreven overeenkomstige apparaten [3]. Het bestaat uit een buis van zirkooncalciumoxide, waarop aan de binnenkant één en, daartegenover, aan de buitenkant twee cilindrische elektrodes van poreus platina zijn aangebracht; zie *fig. 1a* en *fig. 2*. Van deze buitenelektrodes dient de ene (*M*) voor het meten, de andere (*D*) is de reeds genoemde doseer-

N. M. Beekmans en dr. L. Heyne, medewerkers van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

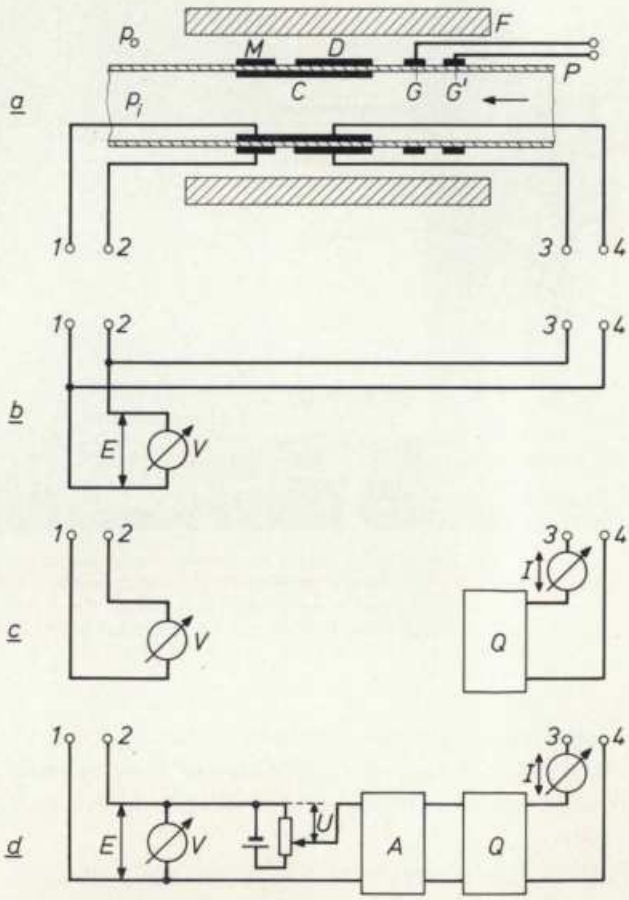

Fig. 1. *a*) Schema van het toestel voor het meten en regelen van de partiële druk van zuurstof in een gasmengsel. *P* buis van zirkooncalciumoxide. *C* binnenelektrode, *M* meetelektrode, *D* doseerelektrode, alle van poreus platina. *F* oven. *G*, *G'* elektrodes voor temperatuurregeling. p_i, p_o partiële zuurstofdrukken binnen resp. buiten de buis. Op de klemmen *1-4* wordt bij verschillende toepassingen van het toestel de desbetreffende hulpapparatuur aangesloten: *b*) voor meten, *c*) voor doseren, *d*) voor automatische regeling van de partiële zuurstofdruk. *V* voltmeter. *Q* stroombron. *I* stroommeter. *A* versterker. *U* instelbare hulpspanning.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info
11/14/2023

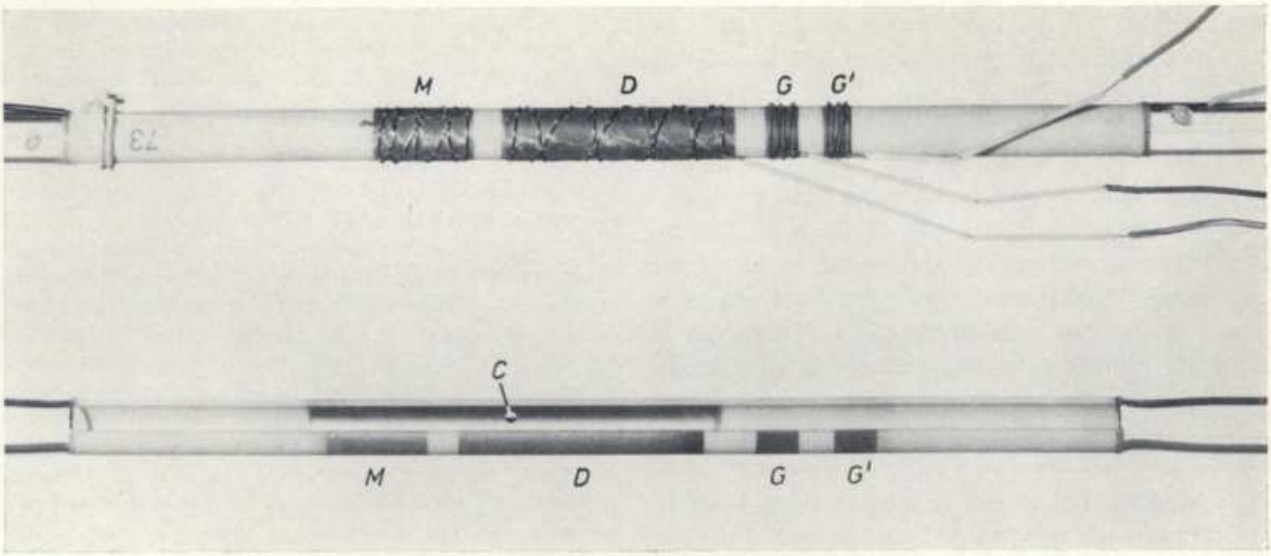

Fig. 2. De buis met elektrodes. *Onder*: een exemplaar waarvan een deel van de wand is verwijderd om de binnenelektrode te tonen. De betekenis van de letters is dezelfde als in fig. 1*a*.

elektrode. Doordat het platina poreus is, kan de zuurstof de elektrodes passeren. Voorts bevordert platina katalytisch de dissociatie en ionisatie van de zuurstof en vice versa, wat vooral bij de dosering essentieel is. (De functie van de elektrodes G, G' zal aanstonds worden besproken.)

Het deel van de aldus gevormde meetcel waar zich de elektrodes bevinden, wordt met behulp van een oven op een constante temperatuur gehouden. Bedragen nu de partiële zuurstofdrukken binnen en buiten de buis resp. p_1 en p_o en is de absolute temperatuur T, dan heerst er tussen de binnenelektrode en de buitenelektrodes een potentiaalverschil E (fig. 1*b*), dat kan worden berekend met de formule van Nernst voor een elektrochemische concentratiecel. In ons geval heeft deze de vorm:

$$E = \frac{kT}{2ze} \ln \frac{p_1}{p_o}. \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

Hierin is k de constante van Boltzmann, z de valentie der bewegende ionen (in ons geval 2) en e de elementaire lading; de hoogste potentiaal ontstaat aan de kant van de hoogste partiële druk. Bij gegeven p_o — in het algemeen de partiële zuurstofdruk van de atmosfeer — is E dus een maat voor de zuurstofdruk p_1 binnen de meetcel.

De spanning E is, bij een constante verhouding van p_1 en p_o, evenredig met de absolute temperatuur; de temperatuur van de buis moet dus zeer stabiel zijn. Deze stabiliteit van de temperatuur is, ook voor variabele gassnelheid, op zeer eenvoudige wijze bereikt door gebruik te maken van de grote (negatieve) temperatuurcoëfficiënt van de elektrische weerstand van zirkooncalciumoxide: op de buis zijn, naast de reeds besproken elektrodes, twee smalle elektrodes G, G' aangebracht (zie fig. 1*a* en 2), en de buiswand tussen G en G' is als weerstand opgenomen in een regelschakeling die de voeding van de oven bestuurt.

Het zojuist gegeven beeld van stroomgeleiding door ionentransport kan enigszins worden vertroebeld door de in zirkooncalciumoxide eveneens aanwezige, zij het meestal geringe, elektronengeleiding, die afhankelijk is van de partiële zuurstofdruk en van de temperatuur [4]. De relatieve „elektronenweerstand" neemt af naarmate de partiële zuurstofdruk daalt en de temperatuur stijgt, waardoor er bij bepaalde combinaties van druk en temperatuur een zekere kortsluiting plaatsvindt. Deze inwendige kortsluiting begrenst het meetgebied aan de lage zijde; verg. (1) is daar niet langer geldig.

Bij minder lage drukken, waar (1) nog goed opgaat, kan een tweede effect van de elektronenweerstand merkbaar worden, nl. zijn werking als belasting van de elektrochemische cel; de als gevolg daarvan lopende stroom maakt dat de cel zich gedraagt alsof hij enigszins lek is voor zuurstof. Dit lek is meestal klein, maar kan zich bij kleine zuurstofconcentraties toch doen gelden. De partiële zuurstofdruk waarbij de invloed van deze inlek merkbaar wordt, hangt sterk af van het systeem waarin de cel wordt toegepast. Met name in vacuümsystemen, waarin vaak met hoge pompsnelheden wordt gewerkt, zal pas bij een druk van 10^{-10}

[1] W. Schottky, Wiss. Veröff. Siemens-Werken **14**, no. 2, 1, 1935.
[2] J. Weissbart en R. Ruka, Rev. sci. Instr. **32**, 593, 1961.
[3] Zie b.v. H. S. Spacil, Metal Progress **96**, no. 5, 106, nov. 1969, en R. G. H. Record, Instr. Practice **24**, 161, 1970 (no. 3).
[4] L. Heyne en N. M. Beekmans, wordt gepubliceerd in Proc. Brit. Ceramic Soc., no. 19.

Digitized in Heiloo the Netherlands
Not for sale!

www.freeservicemanuals.info
11/14/2023

tot 10^{-14} bar een merkbare fout ontstaan, terwijl in gassystemen met lage gassnelheden deze fout al bij 10^{-8} tot 10^{-10} bar kan optreden.

We kunnen de elektronenweerstand vergroten en daarmee de inlek verkleinen door bij lagere temperatuur te werken; dit heeft als nadelen echter een hogere ionenweerstand en hogere eisen aan de katalytische werking van de elektrodes, zodat voor de werktemperatuur een compromis moet worden gezocht. Dank zij de goede katalytische eigenschappen en porositeit van de door ons gebruikte platina elektrodes is de werktemperatuur van het hierboven beschreven toestel ca. 600 °C, dat is lager dan die van de meeste in de literatuur beschreven apparaten (850 °C of hoger); het is zelfs mogelijk het toestel bij nog aanzienlijk lagere temperatuur te gebruiken. De responsietijd, die bij de gekozen temperatuur minder dan 1 seconde bedraagt, zal bij lagere temperaturen wat langer worden.

Dank zij het onderdrukken van de elektronengeleiding is het meetgebied van ons toestel zeer groot, nl. van ca. 10^{-30} bar tot meer dan 1 bar, dat is verscheidene decaden groter dan dat van vele andere systemen voor de bepaling van de partiële zuurstofdruk. De voordelen zijn voor de praktijk evenwel vaak meer gelegen in de eenvoudige hanteerbaarheid, de afwezigheid van vloeistoffen en kwetsbare onderdelen, de grotere stabiliteit en de eenvoudige ijking (zie hiernaast), en ook in het feit dat het zuurstofgehalte bij de meting niet merkbaar door het toestel zelf wordt beïnvloed. Dank zij het logaritmische verband kan desgewenst het gehele meetgebied op één enkele schaal van de voltmeter worden ondergebracht, die in druk of in zuurstofgehalte kan worden geijkt; bovendien is de relatieve nauwkeurigheid in het hele gebied constant. *Fig. 3* toont een meetopstelling met het toestel.

Voor het *doseren* van zuurstof in een gassysteem wordt een stroombron Q aangesloten tussen de binnenelektrode C en de doseerelektrode D (fig. 1*c*). Bij stroomdoorgang zal de stroom in de elektrolytwand uitsluitend worden gedragen door zuurstofionen, die bij de positieve elektrode vrijkomen onder vorming van zeer zuiver, droog zuurstofgas. Eventueel kan tussen C en de meetelektrode M weer een voltmeter worden aangesloten, waarmee nu het effect van de doseerstroom wordt gemeten. Al naar de richting van de stroom wordt er zuurstof aan het systeem toegevoerd of onttrokken, waarbij de stroomsterkte recht evenredig is met de hoeveelheid zuurstof: 1 mA gedurende 1 minuut komt overeen met 3,5 mm³ zuurstof bij standaardtemperatuur en -druk. Doordat de hoeveelheid aldus toegevoerde of onttrokken zuurstof zeer nauwkeurig bekend is, kan een gasstroom van een nauwkeurig bekend zuurstofgehalte worden voorzien. Dit principe wordt tevens gebruikt om het meettoestel te ijken.

Doordat verg. (1) zeer streng geldt, is het mogelijk door keuze van T alle te ijken toestellen aan te passen bij een en dezelfde ijkkromme. We doen dit door de regelschakeling van de oventemperatuur per toestel zo bij te regelen dat 1 decade in p_i (verg. 1) overeenkomt met een en hetzelfde verschil in E, b.v. de „nette" waarde 45 mV (corresponderend met $T \approx 900$ °K). Daarbij wordt het verschil in p_i nauwkeurig gedoseerd met een voorgeschakeld exemplaar van hetzelfde toestel.

De ijking verloopt nu als volgt. Vóór het bijregelen blijkt de temperatuur van de meetcel meestal zodanig te zijn dat bij meting in het p.p.m.-gebied de meetfout ten hoogste een factor 2 bedraagt. Door de twee in serie geschakelde toestellen wordt nu een stroom helium geleid, en de p_i van de reeds zonder doseren in het helium aanwezige zuurstof wordt gemeten met het *ongeijkte* toestel, dat b.v. 2 p.p.m. aanwijst. Dan wordt de stroombron van het doseertoestel ingeschakeld (3 mA), en wordt er een *nauwkeurig* bekende hoeveelheid zuurstof in de heliumstroom gebracht, overeenkomend met, zeg, 100 p.p.m. precies. De totale zuurstofconcentratie is dan dus ca. 102 p.p.m., wat volgens verg. (1) bij de gewenste 45 mV potentiaalverschil per decade zuurstofdruk moet corresponderen met 148,8 mV. De regelschakeling voor de temperatuur wordt nu zo ingesteld dat de voltmeter deze 148,8 mV aanwijst. Vervolgens wordt de stroombron uitgeschakeld; het toestel meet dan weer het oorspronkelijke gehalte, maar het is nu beter geijkt en wijst voor p_i b.v. de nauwkeuriger waarde 2,4 p.p.m. aan. Met opnieuw ingeschakelde stroombron wordt de aanwijzing dan 102,4 p.p.m. zuurstof, overeenkomend met 148,7 mV. De temperatuur moet dus nog slechts heel weinig gecorrigeerd worden. Deze procedure wordt herhaald totdat alle combinaties van concentratie en potentiaalverschil consistent zijn. In de praktijk wordt in 1 keer de vereiste nauwkeurigheid (0,1 mV bij 100 p.p.m.) bereikt.

De p_i is niet onafhankelijk van de gasstroom; daarom wordt een speciaal ontwikkelde zeepvlies-gasstroommeter gebruikt om de gasstroom te meten. Ook worden correcties aangebracht voor variaties in luchtdruk en kamertemperatuur.

Ook kan men de stroombron Q via een versterker A laten besturen door de spanning E over de meetelektrodes C en M (fig. 1*d*); men verkrijgt dan een *automatische regeling* van de partiële zuurstofdruk. De waarde van deze druk kan worden ingesteld door aan de ingang van de versterker het verschil van de spanning E en een instelbare spanning U toe te voeren.

Voor talrijke gevallen waar direct of indirect het meten en regelen van een zuurstofdruk te pas komt — en waarbij het werken op een hoge temperatuur geen bezwaar vormt —, biedt het beschreven toestel verrassende mogelijkheden, b.v. voor het meten van partiële drukken van bekende, met zuurstof reagerende componenten van een gasmengsel, zoals H_2, CO, CH_4, voor de kwantitatieve analyse van gasmengsels en voor de vacuümtechniek. We willen hier enkele toepassingen bespreken.

Voor het meten van partiële drukken van met zuurstof reagerende gassen behoeft aan het toestel geen enkele wijziging te worden aangebracht, maar dienen wel bepaalde andere gassen afwezig of kwantitatief bekend te zijn. Als belangrijk voorbeeld bespreken we de bepaling van het CO-gehalte in verbrandingsgassen

Digitized in Heiloo the Netherlands
Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

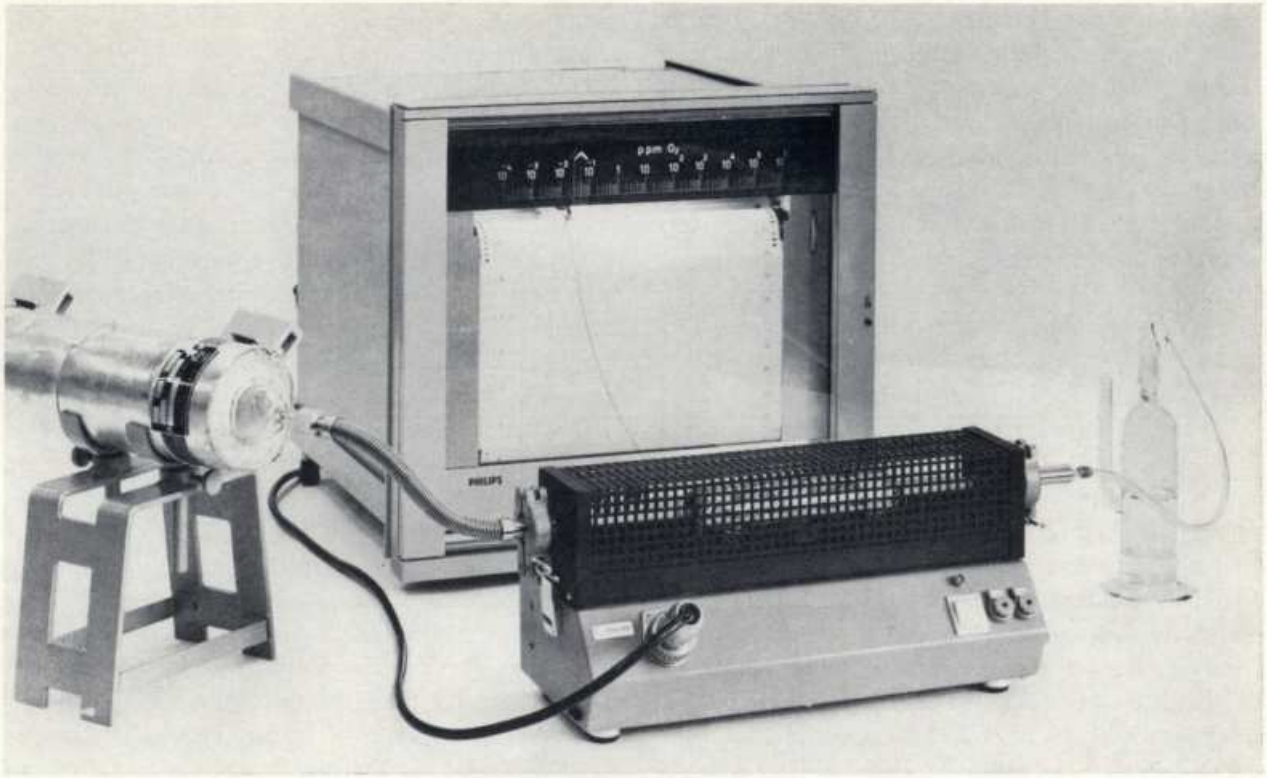

Fig. 3. Opstelling voor de registratie van de zuurstofconcentratie in stikstof tijdens geleidingsmetingen aan oxiden. Het kastje op de voorgrond bevat in de bovenbouw de meetcel, omgeven door de oven; in de onderbouw bevindt zich de ovenregeling.

van onvolledig verbrande stookolie [5].

In de verbrandingsgassen van onvolledig met lucht verbrande stookolie komen voor: waterdamp, kooldioxide, koolmonoxide en stikstof. Voor de bepaling van het CO-gehalte wordt nu een klein gedeelte van het verbrandingsgas door het toestel geleid. In de evenwichtstoestand wordt de partiële zuurstofdruk in dit gasmengsel bepaald door het chemisch evenwicht tussen CO en CO_2:

$$p(O_2) = \frac{p(CO_2)^2}{p(CO)^2} \cdot K_p. \quad . \; . \; . \; . \quad (2)$$

De instelling van dit evenwicht geschiedt snel, doordat het poreuze platina van de elektrodes weer als katalysator werkt. De waarde van de evenwichtsconstante K_p is bekend. Uit (1) en (2) volgt nu voor de partiële koolmonoxidedruk $p(CO)$:

$$E = -\frac{kT}{4e}\left[2 \ln \frac{p(CO)}{p(CO_2)} + \ln \frac{p_o}{K_p}\right]. \quad . \; . \quad (3)$$

Voor kleine CO-gehaltes, b.v. 10^{-4} tot 10 vol.-%, mogen we de partiële kooldioxidedruk $p(CO_2)$ als constant beschouwen; voor de waarde van $p(CO_2)$ mogen we dan nemen die welke volgt uit de reactievergelijking van de *volledige* verbranding van de stookolie. Blijkens (3) correspondeert dus voor kleine CO-gehaltes met de lineaire schaal van de voltmeter een logaritmische CO-schaal. De inlek, hierboven genoemd als de factor die het meetgebied begrenst, speelt bij dit soort metingen ondanks de zeer lage waarde van $p(O_2)$ nauwelijks een rol. Dit komt doordat de partiële koolmonoxide- en kooldioxidedrukken, die volgens (2) de partiële zuurstofdruk bepalen, door deze inlek relatief slechts uiterst weinig kunnen veranderen.

Deze toepassing demonstreert goed het enorme meetgebied van het toestel: een gehalte van 1 vol.-% koolmonoxide in de verbrandingsgassen komt nl. overeen met een partiële zuurstofdruk in de meetcel van ca. 10^{-20} bar, zodat een overgang van volledige verbranding met 1% overmaat zuurstof naar onvolledige verbranding met 1% koolmonoxide een verandering van het zuurstofgehalte veroorzaakt van 18 decaden. Deze meetmethode is daarom zeer geschikt voor het optimaliseren van verbrandingsprocessen, b.v. het instellen van installaties voor centrale verwarming, of voor de bewaking van afvoergassen in ketelhuizen.

Als contrast met bovengenoemde toepassing, waar gebruik werd gemaakt van de zeer lage ondergrens van het meetgebied, geven we een voorbeeld van het gebruik van het toestel bij de bewaking van een zuurstof-

[5] Zie ook het artikel van Record [3].

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gehalte van enige procenten. Bij bepaalde soorten ferroxcube is de verhouding Fe^{2+}/Fe^{3+} een belangrijke parameter voor bepaalde fysische eigenschappen. Deze verhouding kan worden gecontroleerd door het sinterproces te doen plaatsvinden in een schutgas dat zuurstof bevat; het vereiste gehalte aan zuurstof is echter een functie van de temperatuur. De ca. 20 meter lange sinterovens bevatten compartimenten van verschillende temperatuur. Deze zijn gescheiden door gasdichte schotten, waarbij de zuurstofconcentratie in drie compartimenten gecontroleerd wordt met de hier beschreven zirkooncalciumoxide-zuurstofmeter.

Een toepassing voor weer een andere orde van grootte, gelegen tussen die der beide voorgaande toepassingen in, vindt men bij de fabricage van hoogspanningstransistors. Hier kan reeds een kleine hoeveelheid zuurstof binnen de metalen omhulling van deze transistors de doorslagspanning nadelig beïnvloeden. Daarom dient het dichtlassen ervan te gebeuren in een stikstofatmosfeer die slechts enige delen per miljoen aan zuurstof mag bevatten. Deze lasbewerking vindt plaats in een handschoenenkast, waarbij het gehalte aan zuurstof in het schutgas wordt bepaald met onze zirkooncalciumoxide-zuurstofmeter.

In de gezondheidszorg kan het toestel nuttig zijn bij het longonderzoek [6]. De zeer grote aanwijssnelheid maakt het mogelijk de variatie in de zuurstofconcentratie van uitgeademde lucht tijdens de normale ademhaling te registreren.

Wat het doseren van zuurstof betreft, zijn de toepassingsmogelijkheden van het toestel legio. We noemen hier de kwantitatieve analyse van gasmengsels, die berust op de op blz. 122 besproken mogelijkheid van automatische regeling van de partiële zuurstofdruk. Willen we b.v. het onbekende gehalte van een reducerend gas in een inert gas bepalen, dan stellen we de regeling in op een lage zuurstofdruk in de meetcel, b.v. 10^{-10} bar. De versterker zorgt ervoor dat deze druk constant blijft en dat er bij doorleiden van het gasmengsel dus precies zoveel zuurstof in de gasstroom gebracht wordt als nodig is om het reducerend gas volledig te verbranden. De verbrandingsvergelijking levert het verband tussen de gemeten doseerstroom en de hoeveelheid reducerend gas die per tijdseenheid in de cel geleid wordt. De opstelling kan aldus worden gebruikt b.v. om de brandbare componenten te detecteren die uit een ervóór geplaatste gaschromatografische kolom treden [7]. De gevoeligheid van dit systeem is van dezelfde orde van grootte als die van detectie door vlamionisatie. Evenwel is het ionisatierendement bij onze cel 100%, dat is $10^5\times$ zo hoog als bij de vlamionisatie [8], zodat er geen gevoelige stroomversterkers nodig zijn. Bovendien is het gaschromatogram zonder ijking om te rekenen in hoeveelheden van de verschillende componenten.

Hoewel de hier besproken toepassingen betrekking hebben op het gebruik van het toestel in gassystemen, kan het ook zeer goed toegepast worden in vacuümsystemen. Voorbeelden vindt men o.a. bij het reactief verstuiven van siliciumdioxide in een glimontlading, waar de zuurstofdruk van het verstuivingsgas de depositiesnelheid van het katodemateriaal beïnvloedt, en bij het opdampen van nikkel-chroom-legeringen, tijdens welk proces een zeer lage zuurstofdruk nodig is voor het verkrijgen van de juiste specifieke weerstand en temperatuurcoëfficiënt. Het gebruik van een automatisch regelsysteem voor het constant houden van de zuurstofdruk in het lagedruksysteem van een thermobalans is al eerder in dit tijdschrift genoemd [9].

Het zal duidelijk zijn dat het gebruik van de vaste elektrolyt voordelen biedt boven het gebruik van een vloeibare elektrolyt: in de eerste plaats wordt er uitsluitend zuurstof getransporteerd en niets anders — dus ook geen waterdamp —, verder fungeert de buis als scheidingswand van het gassysteem en de atmosfeer, en ten slotte kan alleen bij dit type elektrolyt de zuurstof zonder tussenstap zowel aan een systeem worden toegevoerd als eraan onttrokken.

---

[6] I. E. Sodal, R. R. Bowman en G. F. Filley, J. appl. Physiol. **25**, 181, 1968.

[7] Deze toepassing wordt op het ogenblik ontwikkeld door ir. B. Jansen van dit laboratorium.

[8] Zie voor de definities van de hier genoemde begrippen: J. F. J. Krugers, Ionisatiedetectoren in gaschromatografie, Centrex, Eindhoven 1964, blz. 51 en 52.

[9] P. J. L. Reijnen, Philips techn. T. **31**, 25, 1970 (no. 1).

Samenvatting. Van sommige vaste oxiden, b.v. zirkooncalciumoxide, worden de zuurstofionen bij hoge temperatuur beweeglijk, zodat de stof dan als een vaste elektrolyt kan fungeren. Bevinden zich aan weerszijden van een wand die uit een dergelijk oxide bestaat, gassen met verschillende partiële zuurstofdruk, dan zal er door diffusie van zuurstofionen een potentiaalverschil ontstaan. Dit verschijnsel is toegepast in een eenvoudig, solide toestel waarmee men niet alleen partiële zuurstofdrukken — over 30 decaden — kan meten, maar bovendien gelijktijdig zuurstof in een gassysteem kan doseren. De elektrodes zijn van platina; de goede katalytische eigenschappen en porositeit daarvan maken een werktemperatuur van ca. 600 °C mogelijk. Hierdoor blijft de elektronengeleiding ten opzichte van de ionengeleiding zo gering dat de onderste meetgrens voor partiële zuurstofdrukken zeer laag ligt (ca. 10^{-30} bar). Met het toestel kunnen tevens partiële drukken van met zuurstof reagerende componenten in een gasmengsel worden gemeten. Door het doseren van zuurstof te besturen met het ontstane potentiaalverschil verkrijgt men een automatische regeling van de zuurstofdruk. Van de vele mogelijke toepassingen van het toestel worden kort beschreven of aangestipt: het meten van het CO-gehalte in verbrandingsgassen, waarbij het toestel juist in het overgangsgebied van zwak O_2-houdend naar zwak CO-houdend het gevoeligst is; bewaking van het O_2-gehalte in het schutgas bij het sinteren van ferroxcube en in de N_2-atmosfeer bij het dichtlassen van hoogspanningstransistors; longonderzoek; kwantitatieve bepaling van reducerend gas in de gaschromatografie; en enige toepassingen in de vacuümtechniek.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info

11/14/2023

Recente wetenschappelijke publikaties

Deze publikaties zijn afkomstig van medewerkers van laboratoria en fabrieken, behorende tot of samenwerkende met ondernemingen van het Philipsconcern, in het bijzonder van medewerkers van de navolgende research-laboratoria:

Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven	*E*
Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland	*M*
Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk	*L*
Philips Forschungslaboratorium Aachen GmbH, Weißhausstraße, 51 Aachen, Duitsland	*A*
Philips Forschungslaboratorium Hamburg GmbH, Vogt-Kölln-Straße 30, 2000 Hamburg 54, Duitsland	*H*
MBLE Laboratoire de Recherches, 2 avenue Van Becelaere, 1170 Brussel (Boitsfort), België	*B*

Van de meeste dezer publikaties zullen binnenkort overdrukken beschikbaar zijn. Men kan deze aanvragen bij het betrokken laboratorium (zie de codeletter) of bij de Administratie van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

D. Andrew, J. P. Gowers, J. A. Henderson, M. J. Plummer, B. J. Stocker & A. A. Turnbull: A GaAs-Cs-O transmission photocathode.
J. Physics D **3**, 320-326, 1970 (No. 3). *M*

A. J. F. de Beer & G. Diemer: Geïntegreerde schakelingen, 2. Opbouw en toepassingen.
Natuur en Techniek **37**, 318-327, 1969 (No. 9). *E*

V. Belevitch: Minimum-gyrator cascade synthes is of lossless *n*-ports.
Philips Res. Repts. **25**, 189-197, 1970 (No. 3). *B*

K. Bethe & J. Verweel: On dielectric losses at microwaves: sensitive measurements and results.
IEEE Trans. **MAG-5**, 474-477, 1969 (No. 3). *H*

G. Blasse: Luminescence of the tungstate group in scheelite and fergusonite.
Philips Res. Repts. **25**, 231-236, 1970 (No. 4). *E*

R. Bleekrode & W. van Benthem: Resonance fluorescence of Cu atoms in the gas phase.
J. chem. Phys. **51**, 2757-2758, 1969 (No. 6). *E*

P. F. Bongers: Faraday rotation of infrared and visible light by magnetic materials.
IEEE Trans. **MAG-5**, 472, 1969 (No. 3). *E*

C. J. Bouwkamp: Packing a rectangular box with the twelve solid pentominoes.
J. combin. Theory **7**, 278-280, 1969 (No. 3). *E*

C. J. Bouwkamp & N. G. de Bruijn (Technical University of Eindhoven): On some formal power series expansions.
Proc. Kon. Ned. Akad. Wetensch. **A 72**, 301-308, 1969 (No. 4). *E*

J. C. Brice, O. F. Hill & P. A. C. Whiffin: A modification to the Czochralski method of crystal pulling.
J. Crystal Growth **6**, 297-298, 1970 (No. 3). *M*

J. van den Broek & A. Netten: Photoconductivity in lead-tin monoxide.
Philips Res. Repts. **25**, 145-154, 1970 (No. 3). *E*

K. H. J. Buschow: The erbium-copper system.
Philips Res. Repts. **25**, 227-230, 1970 (No. 4). *E*

K. H. J. Buschow & A. S. van der Goot: The holmium-cobalt system.
J. less-common Met. **19**, 153-158, 1969 (No. 3). *E*

K. H. J. Buschow, A. S. van der Goot & J. Birkhan: Rare-earth copper compounds with $AuBe_5$ structure.
J. less-common Met. **19**, 433-436, 1969 (No. 4). *E*

K. H. J. Buschow, P. A. Naastepad (Philips Philite and Metalware Manufacturing Division, Eindhoven) **& F. F. Westendorp:** Preparation of $SmCo_5$ permanent magnets.
J. appl. Phys. **40**, 4029-4032, 1969 (No. 10). *E*

R. J. Carbone & W. J. Witteman: Vibrational energy transfer in CO_2 under laser conditions with and without water vapor.
IEEE J. Quantum Electronics **QE-5**, 442-447, 1969 (No. 9). *E*

H. B. G. Casimir: G. Holst: profile of a research director.
Science Journal **5A**, No. 1, 80-84, 1969. *E*

H. B. G. Casimir: Remarks on the formulation of magnetic theory.
IEEE Trans. **MAG-5**, 159-161, 1969 (No. 3). *E*

H. B. G. Casimir: On supergain antennae.
Philips Res. Repts. **25**, 237-243, 1970 (No. 4). *E*

J. A. Clarke: Light-gathering properties of curved fibre optic faceplates.
Optica Acta **17**, 123-130, 1970 (No. 2). *M*

H. Dammann: Blazed synthetic phase-only holograms.
Optik **31**, 95-104, 1970 (No. 1). *H*

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info
11/14/2023

M. Davio: Extremal solutions of unate Boolean equations.
Philips Res. Repts. **25**, 201-206, 1970 (No. 4). *B*

M. Davio & P. Piret: Les dérivées booléennes et leur application au diagnostic.
Rev. MBLE **12**, 63-76, 1969 (No. 3). *B*

J. C. Diels & H. M. G. J. Trum: Gain measurements at 10.6 μ in pulse-generated CO_2 plasmas at high pressures.
Physics Letters **29A**, 697-698, 1969 (No. 11). *E*

P. Dolizy & R. Legoux: A new technology for transferring photocathodes.
Adv. in Electronics and Electron Phys. **28A**, 367-373, 1969. *L*

G. Engelsma: Low-temperature dependent development of phenylalanine ammonia-lyase in gherkin hypocotyls.
Naturwiss. **56**, 563, 1969 (No. 11). *E*

U. Enz, W. Lems, R. Metselaar, P. J. Rijnierse & R. W. Teale (University of Sheffield, England): Photomagnetic effects.
IEEE Trans. **MAG-5**, 467-472, 1969 (No. 3). *E*

G. Eschard & J. Graf: Quelques problèmes concernant les multiplicateurs canalisés pour intensificateur d'image.
Adv. in Electronics and Electron Phys. **28A**, 499-506, 1969. *L*

G. Eschard & R. Polaert: Tubes obturateurs pour photographie ultra-rapide au temps de pose d'une nanoseconde.
Adv. in Electronics and Electron Phys. **28B**, 989-998, 1969. *L*

L. Fraiture & J. Neirynck: Theory of unit-elements filters.
Rev. HF **7**, 325-340, 1969 (No. 12). *B*

K. G. Freeman, R. N. Jackson, P. L. Mothersole (Mullard Central Appl. Lab., Mitcham, England) **& S. J. Robinson:** Some aspects of direct television reception from satellites.
Proc. IEE **117**, 515-520, 1970 (No. 3). *M*

A. A. van der Giessen & C. J. Klomp: The preparation of iron powders consisting of submicroscopic elongated particles by pseudomorphic reduction of iron oxides.
IEEE Trans. **MAG-5**, 317-320, 1969 (No. 3). *E*

A. H. Gomes de Mesquita & A. Bril: Preparation and cathodoluminescence of Ce^{3+}-activated yttrium silicates and some isostructural compounds.
Mat. Res. Bull. **4**, 643-650, 1969 (No. 9). *E*

C. A. A. J. Greebe & K. A. Ingebrigtsen (Norwegian Institute of Technology, Trondheim): On the electric coupling between mechanically transverse electroacoustic surface waves and an adjoining medium.
Physics Letters **30A**, 364-365, 1969 (No. 6). *E*

A. van de Grijp, T. Holtwijk & R. M. G. Wijnhoven: SATAN: a versatile memory array tester.
IEEE Trans. **MAG-5**, 656-661, 1969 (No. 3). *E*

G. Groh & G. W. Stroke (State University of New York, Stony Brook, N.Y.): Information retrieval from coded images formed by generalized imaging systems.
Optics Comm. **1**, 339-340, 1970 (No. 7). *H*

H. J. M. de Haan: THEMIS, three-hole element memory with integrated selection.
IEEE Trans. **MAG-5**, 403-407, 1969 (No. 3). *E*

W. van Haeringen & H.-G. Junginger: Pseudopotential approach to the energy band structure of graphite.
Solid State Comm. **7**, 1723-1725, 1969 (No. 23). *E, A*

E. E. Havinga, J. H. N. van Vucht & K. H. J. Buschow: Reply to the comments of K. A. Gschneidner (*pp. 255-256, on the paper "Relative stability of various stacking orders in close-packed metal structures"*).
Philips Res. Repts. **25**, 257-258, 1970 (No. 4). *E*

J. C. M. Henning: Het meten van exchange met behulp van elektronenspin-resonantie.
Ned. T. Natuurk. **35**, 317-333, 1969 (No. 11). *E*

J. C. M. Henning, P. F. Bongers, H. van den Boom & A. B. Voermans: E.S.R. investigations on chromium doped $CdIn_2S_4$.
Physics Letters **30A**, 307-308, 1969 (No. 5). *E*

J. C. M. Henning & H. van den Boom: An orthorhombic Fe^{2+} centre in Cs_3ZnCl_5.
Philips Res. Repts. **25**, 155-170, 1970 (No. 3). *E*

P. Holst & M. Lemke: Ferrite substrates for microwave integrated systems.
IEEE Trans. **MAG-5**, 478-480, 1969 (N*Ho*. 3).

H.-G. Junginger & W. van Haeringen: Energy band structures of four polytypes of silicon carbide calculated with the empirical pseudopotential method.
Phys. Stat. sol. **37**, 709-719, 1970 (No. 2). *A, E*

E. M. H. Kamerbeek: On the theoretical and experimental determination of the electromagnetic torque in electrical machines.
Thesis, Eindhoven 1970. *E*

F. M. Klaassen: On the geometrical dependence of $1/f$ noise in MOS transistors.
Philips Res. Repts. **25**, 171-174, 1970 (No. 3). *E*

A. Klopfer: Sauerstoffdesorption von Wolfram durch Elektronenstoß.
Vakuum-Technik **19**, 1-8, 1970 (No. 1/2). *A*

A. Klopfer: Desorption durch Elektronenbeschuß von Wolfram mit adsorbiertem Wasser.
Vakuum-Technik **19**, 37-42, 1970 (No. 3). *A*

A. Klopfer: Desorption durch Elektronenbeschuß von Molybdän mit adsorbierten Gasen: H_2, O_2, H_2O.
Surface Sci. **20**, 129-142, 1970 (No. 1). *A*

Digitized in Heiloo the Netherlands
Not for sale!

www.freeservicemanuals.info

11/14/2023

P. van der Laan (Philips Information Systems and Automation Division, Eindhoven): Simple distribution-free confidence intervals for a difference in location.
Thesis, Eindhoven 1970.

H. Levine (Dept. of Mathematics, Stanford Univ., Cal.): Some problems in potential theory.
Philips Res. Repts. **25**, 207-222, 1970 (No. 4).

J. Loeckx: Analyse syntaxique et transducteurs à pile.
Math. Comm. Twente Univ. **5**, 1-20, 1969 (No. 1). *B*

J. Loeckx: Grammaires formelles et automates.
Bull. Soc. Math. Belg. **21**, 145-165, 1969 (No. 2). *B*

F. A. Lootsma: Boundary properties of penalty functions for constrained minimization.
Thesis, Eindhoven 1970. *E*

F. A. Lootsma & J. D. Pearson (Philips Information Systems and Automation Division, Eindhoven): An indefinite-quadratic-programming model for a continuous-production problem.
Philips Res. Repts. **25**, 244-254, 1970 (No. 4). *E*

F. K. Lotgering & G. H. A. M. van der Steen: Metal-deficient sulphospinels.
Solid State Comm. **7**, 1827-1829, 1969 (No. 24). *E*

M. H. van Maaren & H. B. Harland: Critical carrier concentration for superconductivity in a $CuRh_2Se_4$-based system.
Physics Letters **30A**, 204-205, 1969 (No. 3). *E*

J.-M. Martinache (Faculté des Sciences de Lille), **A. Semichon, E. Constant** (Fac. Sci. Lille) **& A. Vanoverschelde** (Fac. Sci. Lille): Sur le bruit de fond d'une diode à avalanche à barrière métal-semi-conducteur.
C.R. Acad. Sci. Paris **269B**, 644-647, 1969 (No. 14). *L*

R. J. Meijer: Rebirth of the Stirling engine.
Science Journal **5A**, No. 2, 31-37, 1969. *E*

F. Meyer: Plane specificity in the reaction of methanol and ethanol vapor with clean germanium.
J. phys. Chem. **73**, 3844-3848, 1969 (No. 11). *E*

J. Monin (Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris), **J. Houdard & G.-A. Boutry** (Cons. Nat. A. et M.): Nouvelle méthode pour la détermination des paramètres définissant une vibration elliptique.
C.R. Acad. Sci. Paris **270B**, 200-203, 1970 (No. 3). *L*

J. Monin (Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris), **J. Houdard & G.-A. Boutry** (Cons. Nat. A. et M.): Détermination des constantes optiques du césium dans le visible et dans le proche ultraviolet.
C.R. Acad. Sci. Paris **270B**, 279-282, 1970 (No. 4). *L*

W. C. Nieuwpoort & R. Bleekrode: On intensity alterations in C_2 "Swan" emission spectra.
J. chem. Phys. **51**, 2051-2055, 1969 (No. 5). *E*

S. G. Nooteboom (Institute for Perception Research, Eindhoven): The tongue slips into patterns.
Nomen, Leyden studies in linguistics and phonetics, 1969, pp. 114-132.

J. M. Noothoven van Goor: Impurity scattering in pure bismuth.
Physics Letters **29A**, 685-686, 1969 (No. 11). *E*

L. J. van der Pauw: Influence of diffraction on the four-pole impedances of electroacoustic delay lines with circular or rectangular plane-parallel transducers.
J. Acoust. Soc. Amer. **46**, 497-507, 1969 (No. 3, Part 1). *E*

L. J. van der Pauw: Four-pole properties of an electroacoustic delay line with plane-concave transducers.
J. Acoust. Soc. Amer. **46**, 508-516, 1969 (No. 3, Part 1). *E*

L. G. Pittaway: Computer aided design of a new mass spectrometer ion source.
Proc. Int. Conf. on Ion Sources, Saclay 1969, pp. 449-458. *M*

L. J. van de Polder: Beam-discharge lag in a television pick-up tube.
Adv. in Electronics and Electron Phys. **28A**, 237-245, 1969. *E*

J. E. Ralph: Cathodoluminescence of Er^{3+} in YGaG and YAG.
J. Phys. Chem. Solids **31**, 507-516, 1970 (No. 3). *M*

G. W. Rathenau: Reflections on the INTERMAG conferences.
IEEE Trans. **MAG-5**, 154-156, 1969 (No. 3). *E*

A. G. Roederer (SODERN, Paris): Calculation of the electromagnetic field radiated by a log-periodic dipole antenna.
Philips Res. Repts. **25**, 175-188, 1970 (No. 3).

J. H. T. van Roosmalen: Adjustable saturation in a pick-up tube with linear light transfer characteristic.
Adv. in Electronics and Electron Phys. **28A**, 281-288, 1969. *E*

H. D. Rüpke: Magnetodynamic modes in ferrite spheres for microwave filter application.
IEEE Trans. **MAG-6**, 80-84, 1970 (No. 1). *H*

J. C. Schepers: De glasexpositie op de Glastechnische Dag 1969 te Petten, verzorgd door de Glastechnische Afdeling van het Philips Natuurkundig Laboratorium te Waalre.
Glastechn. Meded. **7**, 147-159, 1969 (No. 4). *E*

E. Schwartz: Die Bandbreite von Anpassungsvierpolen mit zwei Reaktanzen.
Archiv elektr. Übertr. **24**, 179-186, 1970 (No. 4). *A*

H. Schweppe: Elastic and piezoelectric properties of paratellurite (TeO_2).
Ultrasonics **8**, 84-87, 1970 (No. 2). *A*

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

P. J. Severin: Superphase velocity effects caused by a single electron in a ferrite.
Physica **45**, 253-256, 1969 (No. 2). *E*

J. G. Siekman: Nieuwe ontwikkelingen in de microbewerking, I. Microbewerkingen met gefocusseerde deeltjesbundels.
Ingenieur **81**, O 105-112, 1969 (No. 39). *E*

I. H. Slis & A. Cohen (Institute for Perception Research, Eindhoven): On the complex regulating the voiced-voiceless distinction, I, II.
Language and Speech **12**, 80-102, 137-155, 1969 (Nos. 2, 3).

F. A. Staas & A. P. Severijns: Vorticity in He II and its application in a cooling device.
Cryogenics **9**, 422-426, 1969 (No. 6). *E*

K. Timling: Scaled-particle theory of two-dimensional anisotropic fluids.
Philips Res. Repts. **25**, 223-226, 1970 (No. 4). *E*

J. G. Verhagen & A. Liefkens: Gasbescherming bij het gasbooglassen.
Lastechniek **35**, 241-247, 1969 (No. 12). *E*

J. Verweel: On the HF permeability of dense ferrites in polarizing fields.
IEEE Trans. **MAG-5**, 622-625, 1969 (No. 3). *H*

A. G. van Vijfeijken, A. Walraven & F. A. Staas: Energy and stability of vortex rings in liquid helium II; critical velocities.
Physica **44**, 415-436, 1969 (No. 3). *E*

Q. H. F. Vrehen, H. G. Beljers & J. G. M. de Lau: Microwave properties of fine-grain Ni and Mg ferrites.
IEEE Trans. **MAG-5**, 617-621, 1969 (No. 3). *E*

J. S. C. Wessels: Isolation and properties of two digitonin-soluble pigment-protein complexes from spinach.
Progress in Photosynthesis Research, Vol. I, pp. 128-136, 1969. *E*

R. M. G. Wijnhoven: Magnetoelectronic mass stores.
IEEE Trans. **MAG-5**, 640-641, 1969 (No. 3). *E*

E. E. Windsor: A sensitive high vacuum gauge using an electron multiplier.
Vacuum **20**, 7-9, 1970 (No. 1). *M*

S. Wittekoek & P. F. Bongers: Observation of Cr^{3+} absorption bands in $CdIn_2S_4$ (Cr) and the consequences for the interpretation of the absorption edge of $CdCr_2S_4$.
Solid State Comm. **7**, 1719-1722, 1969 (No. 23). *E*

P. L. Wodon: Data structure and storage allocation.
BIT **9**, 270-282, 1969 (No. 3). *B*

J. P. Woerdman & B. Bölger: Diffraction of light by a laser induced grating in Si.
Physics Letters **30A**, 164-165, 1969 (No. 3). *E*

P. Wurtz: Thermographe médical.
Acta electronica **12**, 339-351, 1969 (No. 4). *L*

Inhoud van Philips Telecommunication Review **29**, No. 2, 1970:

P. W. L. van Iterson: Automatically tuned HF transmitter systems for 10 and 30 kW (pp. 41-54).
H. P. J. Grubben & P. Veldkamp: The small EBX 15 private branch telephone exchange using mini-reed contacts (pp. 55-63).
W. Beijnink: The 8TR 352 channel and group modulation equipment for carrier telephone systems (pp. 64-76).
T. Poulsen, H. L. Bakker & W. van Vlijmen: 12 MHz line equipment for coaxial cables type 8TR 317 in operation on the Copenhagen-Aarhus route (pp. 77-83).
H. Bouwman: Modems for data transmission over the public telephone network (pp. 84-86).

Inhoud van Mullard Technical Communications **11**, No. 105, 1970:

B. E. Attwood & B. J. Simpson: Transformerless field timebase for 90° 625-line colour (pp. 102-109).
Ratings of Mullard carbon film resistors (pp. 110-112).
J. M. Lavallee & J. Merrett: The basis of a design for a reversible drive with regenerative braking (pp. 113-120).

Inhoud van Mullard Technical Communications **11**, No. 106, 1970:

D. Mason: High-grade long-life electrolytic capacitors: the 106/107 series in power supply design (pp. 122-129).
D. R. Armstrong: TTL interfacing with GRL111 and GRL101 (pp. 130-138).

Jaargang 31, 1970, no. 4 blz. 97-128 Verschenen 13 januari 1971

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!